



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Εφαρμογή του δείκτη EEDI σε διάφορους τύπους πλοίων - Μελέτη περιπτώσεων**

**Application of EEDI index to various types of ships - Case study**

Συγγραφέας:  
Ντούρου Σταυρούλα  
Α.Μ.: 51114070

Επιβλέπων: Δρ. Μηχ. Νικόλαος Φραγκιαδάκης

Αιγάλεω, 2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική εργασία**

Τίτλος: «Η εφαρμογή του δείκτη EEDI σε διάφορους τύπους πλοίων- Μελέτη περίπτωσης»

**Συγγραφέας**

Ντούρου Σταυρούλα, Α.Μ.: 51114070

**Επιβλέπων καθηγητής**

Δρ. Μηχ. Φραγκιαδάκης Νικόλαος

**Ημερομηνία εξέτασης**

20/07/2023

**Εξεταστική Επιτροπή**

Νικόλαος  
Φραγκιαδάκης  
Ακαδημαϊκός Υπότροφος  
ΠΑ.Δ.Α.

Θωμάς  
Μαζαράκος  
Επίκουρος  
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Δημήτριος - Νικόλαος  
Παγώνης  
Αναπληρωτής  
Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.



## **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ντούρου Σταυρούλα του Μιχαήλ, με αριθμό μητρώου 51114070 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα



Σταυρούλα Ντούρου

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Νικόλαο Φραγκιαδάκη, πρωτίστως για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα και για την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη την περίοδο συγγραφής της. Επιπλέον, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις πολύτιμες συμβουλές και γνώσεις που μου προσέφερε όλη αυτή την περίοδο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για την στήριξή τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί προϊόν βιβλιογραφικής μελέτης περιπτώσεων, με θέμα τη μελέτη του δείκτη *EEDI* καθώς και την εφαρμογή του σε διάφορους τύπους πλοίων. Στον πρόλογο γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του θέματος και στο κύριο μέρος, το οποίο αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια, γίνεται η εκτενής και πλήρης παρουσίασή του. Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται η αναφορά σχετικά με τα περιβαλλοντικά ζητήματα και τους διεθνείς κανονισμούς σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος, ενώ γίνεται και η εισαγωγή του δείκτη σχεδίασης ενεργειακής απόδοσης. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή της έννοιας της ενεργειακής αποδοτικότητας, ενώ παρουσιάζονται τα τεχνολογικά και τα λειτουργικά μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Επιπλέον, γίνεται παρουσίαση του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνονται οι αναλυτικοί υπολογισμοί των τιμών του δείκτη *EEDI* για διάφορες περιπτώσεις πλοίων και πιο συγκεκριμένα για επιβατηγό πλοίο με υβριδικό σύστημα πρόωσης, για δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με υβριδικό σύστημα πρόωσης, με σύστημα εκ νέου υγροποίησης, με σύστημα τουρμπίνας ατμοστροβίλου και για εμπορικό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας παραθέτονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προτάσεις.

## Λέξεις κλειδιά

δείκτης, ενεργειακή αποδοτικότητα, εκπομπές ρύπων, κατανάλωση καυσίμου, ταχύτητα

## **Abstract**

*This thesis is the product of a bibliographic case study on the study of the EEDI index as well as its application to various types of ships. In the prologue there is a brief presentation of the subject and in the main part, which consists of four chapters, there is an extensive and complete presentation of it. In particular, in the first chapter of the thesis, environmental issues and international regulations regarding environmental protection are reported, while the energy efficiency design index is also introduced. In the second chapter, the concept of energy efficiency is introduced, while the technological and operational measures to improve energy efficiency are presented. In addition, the Ship Energy Efficiency Management Plan is presented. In the third chapter, the detailed calculations of the values of the EEDI index are made for various cases of ships, for liquefied natural gas tanker with a hybrid propulsion system(diesel-electric), with a re-liquefaction system as well as with a steam turbine system and for a commercial bulk carrier. Finally, the conclusions and future proposals are presented in the fourth chapter of the work.*

## **Key Words**

*index, energy efficiency, emissions, fuel consumption, speed*



Πίνακας Περιεχομένων	
Ευχαριστίες.....	VI
Περίληψη.....	VII
<i>Abstract</i> .....	VIII
Λίστα Πινάκων.....	X
Λίστα Εικόνων.....	XI
Πρόλογος.....	XII
Κεφάλαιο 1. Περιβαλλοντικά ζητήματα.....	14
1.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	14
1.2 Εκπομπές αέριων ρύπων στις θαλάσσιες μεταφορές.....	17
1.3 Πηγές εκπομπών πλοίων.....	18
1.4 Οι κανονισμοί του <i>IMO</i> .....	21
1.5 Εισαγωγή στον δείκτη <i>EEDI</i> & ιστορική εξέλιξη αυτού.....	25
1.5.1 Γενικά.....	25
1.5.2 Τύπος υπολογισμού του δείκτη <i>EEDI</i> .....	28
1.5.3 Δομή του δείκτη <i>EEDI</i> .....	32
Κεφάλαιο 2. Ενεργειακή αποδοτικότητα πλοίου.....	35
2.1 Γενικά.....	35
2.2 Τεχνολογικά μέτρα για την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.....	36
2.3 Λειτουργικά μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.....	46
2.3.1 Σχεδίαση ταξιδιού ( <i>voyage planning</i> ).....	46
2.3.2 Εκτέλεση ταξιδιού ( <i>voyage execution</i> ).....	48
2.4 Οδηγίες για την εφαρμογή του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας.....	49
2.5 Διαδικασία επαλήθευσης του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας.....	53
Κεφάλαιο 3. Υπολογισμός του δείκτη <i>EEDI</i> .....	60
3.1 Επιβατηγό με υβριδικό σύστημα πρόωσης ( <i>diesel-electric</i> ).....	60
3.2 Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με υβριδικό σύστημα πρόωσης ( <i>diesel-electric propulsion system</i> ).....	63
3.3 Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα εκ νέου υγροποίησης ( <i>re-liquefaction system</i> ).....	66
3.4 Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα πρόωσης τουρμπίνας αμοστρόβιλου.....	69
3.5 Εμπορικό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου, κατηγορίας <i>ice class</i> .....	70
3.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	72
Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα & μελλοντικές προτάσεις.....	77
4.1 Γενικά συμπεράσματα.....	77
4.2 Μελλοντικά μέτρα.....	79
4.3 Μελλοντικές προτάσεις.....	80
Βιβλιογραφία.....	82

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου το 2011 σε σχέση με το 1750 [6].....	16
Πίνακας 2: Ποσοστό μείωσης των εκπομπών για κάθε κατηγορία πλοίου ανά φάση εφαρμογής του δείκτη <i>EEDI</i> [18].....	27
Πίνακας 3: Τιμές των μεταβλητών <i>a</i> , <i>b</i> , <i>c</i> [19] .....	30
Πίνακας 4: Επιτυχημένες κατασκευές τεχνολογίας κυψελών καυσίμου [17].....	45
Πίνακας 5: Τιμές του δείκτη <i>EEDI</i> .....	75
Πίνακας 6: Μέτρα μείωσης των εκπομπών ρύπων και αντίστοιχο ποσοστό μείωσης [18].....	78
Πίνακας 7: Ισχύς κύριων μηχανών σε σχέση με την ταχύτητα [18] .....	79

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Η συγκέντρωση του $CO_2$ στην ατμόσφαιρα [5] .....	16
Εικόνα 2: Απογραφή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στη ναυτιλία για τα έτη 2012-2018[10] .....	18
Εικόνα 3: Τύποι εκπομπών ρύπων, ο εσωτερικός κύκλος αφορά το 2018 και ο εξωτερικός το 2019 [12].....	19
Εικόνα 4: Η κατανάλωση καυσίμου για τα διαφορετικά μεγέθη μηχανών[13] .....	20
Εικόνα 5: Εκπομπές ρύπων ανάλογα με τον τύπο καυσίμου για τα έτη 2018 και 2019 [12] .....	20
Εικόνα 6: Αριθμός αναφορών εκπομπών ρύπων στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τα έτη 2018 και 2019 [12].....	21
Εικόνα 7: Η χρονική εξέλιξη της μείωσης των εκπομπών $CO_2$ ανά φάση εφαρμογής σε σχέση με τη χωρητικότητα των νέων πλοίων [18].....	26
Εικόνα 8: Τιμές του συντελεστή $C_f$ [18].....	29
Εικόνα 9: Τιμή του <i>reference EEDI</i> συναρτήσει της χωρητικότητας του πλοίου[20].....	31
Εικόνα 10: Εγκατάσταση στάτορα στην προπέλα πλοίου για βελτίωση της απόδοσης[23] .....	37
Εικόνα 11: Σύστημα χρήσης του αέρα ως λιπαντικό [25].....	38
Εικόνα 12: Σύγκριση απαιτούμενης ισχύος για συμβατικό πλοίο σε σχέση με πλοίο σχεδίασης <i>slender</i> [26] .....	39
Εικόνα 13: Συγκριτική κατανάλωση καυσίμου σε όλο το φάσμα λειτουργίας των κύριων κινητήρων δύο δεξαμενόπλοιων <i>Aframax</i> [26].....	42
Εικόνα 14: Το πρώτο πλοίο με κυψέλες καυσίμου [32] .....	44
Εικόνα 15: Επίδραση της συσσώρευσης των βιολογικών ρύπων στη γάστρα του πλοίου στην αύξηση των εκπομπών ρύπων [36].....	48
Εικόνα 16: Έντυπο καταγραφής κατανάλωσης καυσίμου [37] .....	51
Εικόνα 17: Έντυπο καταγραφής επιπρόσθετων δεδομένων [37] .....	52
Εικόνα 18: Έντυπο της Επιβεβαίωσης Συμμόρφωσης για το αρχικό στάδιο του ελέγχου [37].....	54
Εικόνα 19: Υπόδειγμα τεχνικού φακέλου [39] .....	57
Εικόνα 20: Καμπύλες ισχύος - ταχύτητας [40] .....	58
Εικόνα 21: Διάγραμμα διαδικασίας επαλήθευσης και ελέγχου [40] .....	59
Εικόνα 22: Τυπική διαμόρφωση του ηλεκτρικού πίνακα του πλοίου δοκιμής [40].....	63
Εικόνα 23: Τυπική διαμόρφωση του ηλεκτρικού πίνακα του πλοίου δοκιμής [40].....	66

## Πρόλογος

Στα πλαίσια της προστασίας του περιβάλλοντος και της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, στον τομέα των θαλασσίων μεταφορών, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (*IMO*) σε συνεργασία με την Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (*MEPC*), έχουν θεσπίσει μια σειρά από μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος και μείωσης των εκπομπών του θερμοκηπίου. Το πρώτο διεθνές μέτρο που θεσπίστηκε είναι η καθιέρωση του Δείκτη Σχεδίασης Ενεργειακής Απόδοσης (*Energy Efficiency Index-EEDI*), καθώς και του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (*Ship Energy Efficiency Management Plan - SEEMP*). Η εφαρμογή αυτών των μέτρων έχει προγραμματιστεί σε τέσσερις φάσεις, με απώτερο σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο 100% έως το έτος 2050. Ο δείκτης *EEDI* μετριέται σε *g/ton.mile*, όπου τα γραμμάρια αφορούν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τονο-μίλια, δηλαδή το γινόμενο της χωρητικότητας του πλοίου με την απόσταση.

Ο δείκτης *EEDI* τέθηκε σε εφαρμογή το 2011 και αρχικά αφορούσε τα υπό κατασκευή πλοία. Όμως, επειδή στα επόμενα έτη οι κανονισμοί σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος έθεταν αυστηρότερα κριτήρια σχετικά με τις εκπομπές των πλοίων, πραγματοποιήθηκαν αρκετές μελέτες σχετικά με την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των υπαρχόντων πλοίων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται εκτενής αναφορά στα περιβαλλοντικά ζητήματα, καθώς και στα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες μέτρων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και επίτευξης χαμηλότερων τιμών του *EEDI*, τα τεχνολογικά και τα λειτουργικά μέτρα. Η εφαρμογή του δείκτη αφορά τα πλοία χωρητικότητας άνω των 400 *GT*. Η ανάλυση και μελέτη του δείκτη *EEDI* είναι πολύ σημαντική για την κατανόηση της ενεργειακής απόδοσης. Οι επιστημονικές μελέτες εστιάζουν στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων, σε σχεδιαστικές αλλαγές που συμβάλλουν στη μείωση των τριβών και αντιστάσεων ώστε να επιτυγχάνεται ίδια ταχύτητα με χαμηλότερη ισχύ, ενώ, τέλος, αναπτύσσονται νέα συστήματα διαχείρισης των απωλειών θερμότητας. Τα λειτουργικά μέτρα που αναπτύσσονται περιλαμβάνουν την πλοήγηση με βάση τα καιρικά φαινόμενα,

τη συμφόρηση και την εποχικότητα, ενώ γίνονται μελέτες που αφορούν την αναδιάρθρωση των γραμμών μεταφοράς του θαλάσσιου εμπορίου. Όλα τα παραπάνω αναφέρονται εκτενώς στην παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ επιπλέον πραγματοποιείται ανάλυση του δείκτη *EEDI* για διαφορετικές κατηγορίες πλοίων. Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι αναγκαία για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής, καθώς οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι πλέον ορατές.

Συνοψίζοντας, ο δείκτης *EEDI* αποτελεί τον λόγο των επιδράσεων της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον προς τα οφέλη που αποκομίζει η κοινωνία.

$$EEDI = \frac{\text{Impact to environment}}{\text{Benefit for society}}$$

## Κεφάλαιο 1. Περιβαλλοντικά ζητήματα

### 1.1 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της ζωής στη Γη. Η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης διατηρείται στο επίπεδο των 15°C χάρη στο συγκεκριμένο φαινόμενο. Η παρατήρηση του φαινομένου έγινε το 1896 από τον *Svante Arrhenius* κατά τη μελέτη της επίδρασης των ανθρακικών οξέων στη θερμοκρασία του εδάφους [1].

Η ηλιακή ακτινοβολία καθιστά τη Γη κατοικήσιμη, όμως μόνο το 70% περίπου αυτής διαπερνά την ατμόσφαιρα, ενώ το υπόλοιπο 30% ανακλάται πίσω στο διάστημα. Η ηλιακή ακτινοβολία που διαπερνά την ατμόσφαιρα απορροφάται και στη συνέχεια, η υπέρυθη ακτινοβολία αντανακλάται από την επιφάνεια της Γης, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της εγκλωβίζεται στην ατμόσφαιρα από τα αέρια του θερμοκηπίου. Η συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 800.000 χρόνια κυμαίνεται από 200 έως 280ppm (*parts per million*), όμως τις τελευταίες τρεις δεκαετίες η συγκέντρωση έχει αυξηθεί σημαντικά ξεπερνώντας τα 400ppm. Αποτέλεσμα της παραπάνω αύξησης, είναι η αύξηση της απορροφούμενης θερμότητας και κατ' επέκταση την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης. Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι τα ακόλουθα [2]:

- Διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ )
- Μεθάνιο ( $CH_4$ )
- Τα οξείδια του αζώτου ( $NO_x$ )
- Χλωροφθοράνθρακες ( $CFCs$ )
- Όζον ( $O_3$ )

Ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των παραπάνω αερίων του θερμοκηπίου.

**Διοξείδιο του άνθρακα:** στα μέσα του 19ου αιώνα κατά την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης, η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα ήταν 270 ppm, καθώς είναι αποτέλεσμα της καύσης των ορυκτών καυσίμων. Η ανθρώπινη δραστηριότητα συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στην αύξηση της συγκέντρωσης. Ιδιαίτερα, μετά το 2015 η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα ξεπέρασε τα 400ppm [3].

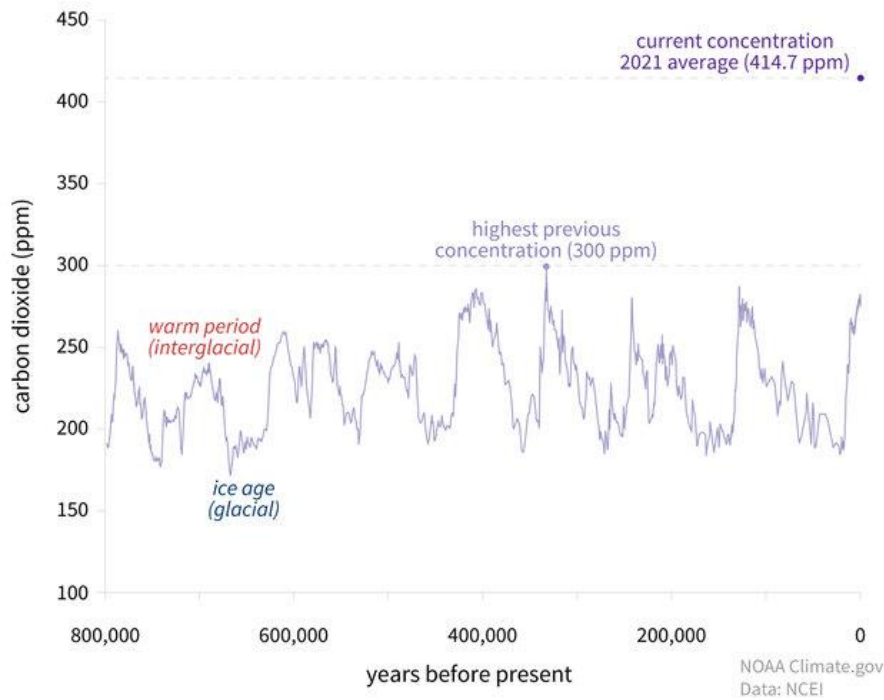
**Μεθάνιο:** είναι ένα από τα ισχυρότερα αέρια του θερμοκηπίου, το οποίο παρ' ότι βρίσκεται σε μικρότερη συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα έχει την ικανότητα να απορροφά σημαντικά υψηλότερη ποσότητα από το διοξείδιο του άνθρακα.

**Οξείδια του αζώτου:** κατά την καύση του αζώτου σχηματίζονται οξείδια. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της καύσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα των σχηματιζόμενων οξειδίων. Οι κυριότερες πηγές μονοξειδίου του αζώτου στην ατμόσφαιρα είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι βιομηχανικοί καυστήρες και γενικότερα οι κλίβανοι, στους οποίους καίγονται ορυκτά καύσιμα.

**Χλωροφθοράνθρακες:** οι εκπομπές τους μειώνονται σημαντικά τα τελευταία έτη, όμως, ο σημαντικά μεγάλος χρόνος ζωής τους αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τη μείωση της συγκέντρωσής τους στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, δεν ανήκουν στην κατηγορία των μεγάλου χρόνου ζωής αερίων του θερμοκηπίου, όπως τα παραπάνω [4].

Στην εικόνα 1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

## CARBON DIOXIDE OVER 800,000 YEARS



Εικόνα 1: Η συγκέντρωση του  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα [5]

Στον πίνακα 1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των βασικών αερίων του θερμοκηπίου που επηρεάζονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα συγκριτικά με την περίοδο πριν τη βιομηχανική επανάσταση και το 2011.

Πίνακας 1: Συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου το 2020 σε σχέση με το 1750 [6]

Αέρια θερμοκηπίου	1750	2020	% αύξηση
$CO_2$	$278 \pm 2(ppm)$	$413,2 \pm 0,2(ppm)$	49%
$CH_4$	$722 \pm 25(ppb)$	$1889 \pm 2(ppm)$	162%
$NO_x$	$270 \pm 7(ppb)$	$333,2 \pm 0,1(ppm)$	23%

Το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί, όμως, καθώς η ανθρώπινη δραστηριότητα δεν επηρεάζει τη συγκέντρωσή τους, δεν αναφέρονται μαζί με τα υπόλοιπα αέρια θερμοκηπίου. Αποτελούν όμως το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου, καθώς συμβάλλουν σε ποσοστό 66%



στο φαινόμενο. Επίσης, οι υδρατμοί είναι το μόνο αέριο του θερμοκηπίου του οποίου η συγκέντρωση εμφανίζει σημαντική χώρο-χρονική μεταβολή.

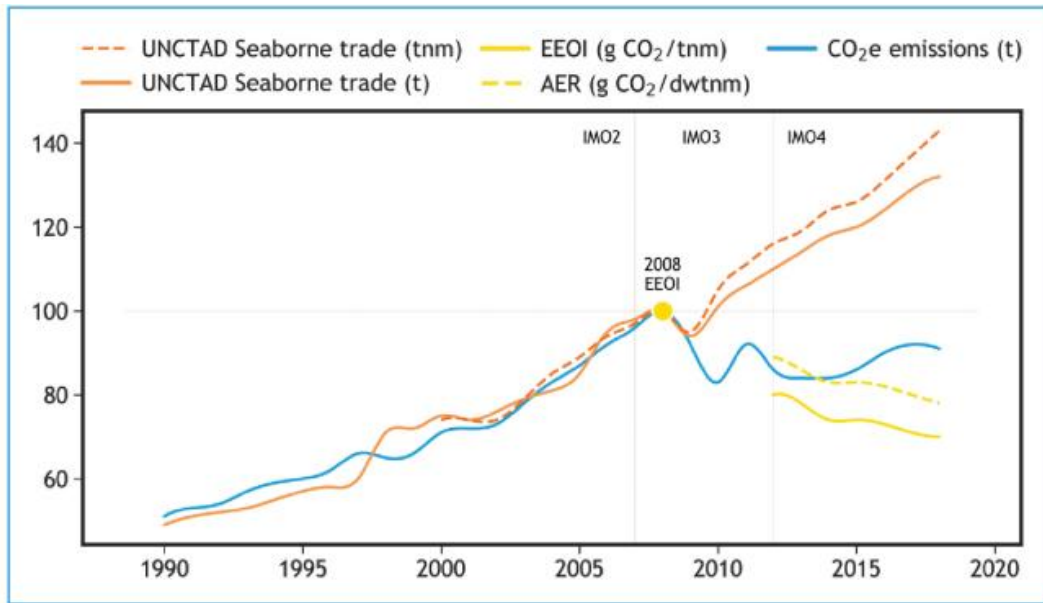
## 1.2 Εκπομπές αέριων ρύπων στις θαλάσσιες μεταφορές

Οι θαλάσσιες μεταφορές έχουν κυρίαρχη θέση στο παγκόσμιο εμπόριο, καθώς πάνω από το 85% του όγκου του παγκόσμιου εμπορίου διακινείται μέσω των θαλασσιών οδών. Το 2020 δια θαλάσσης διακινήθηκαν 11 δισεκατομμύρια τόνοι εμπορευμάτων. Η μόλυνση του αέρα εξαιτίας της θαλάσσιας ανθρώπινης δραστηριότητας έχει επίδραση, τόσο στο περιβάλλον όσο και στην υγεία του ανθρώπου. Το 33% των εκπομπών ρύπων οφείλεται στην καύση ορυκτών καυσίμων κατά τις θαλάσσιες μεταφορές, ενώ το 3,3% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα είναι αποτέλεσμα δραστηριοτήτων της ναυτιλίας [7]. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές ρύπων στη ναυτιλία είναι οι ακόλουθοι [8]:

- Ο τύπος καυσίμου
- Ο κινητήρας
- Η ενεργειακή απόδοση του κινητήρα

Σύμφωνα με στοιχεία από την ιστοσελίδα του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (IMO) [9], οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εκ του συνόλου της ναυτικής δραστηριότητας αυξήθηκαν από 977 εκατομμύρια τόνους το 2012 σε 1.076 εκατομμύρια τόνους το 2018, αύξηση που αντιστοιχεί σε 9,6%. Ειδικότερα, όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η μεταβολή για τα συγκεκριμένα έτη αντιστοιχεί σε 9,3% (από 962 εκατομμύρια τόνους σε 1.056). Όσον αφορά το μερίδιο της ναυτιλίας στις ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αυτές αυξήθηκαν από το 2,76% το 2012 σε 2,89% το 2018.

Στην εικόνα 2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η εξέλιξη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη διεθνή ναυτιλία για τα έτη 2012 - 2018.



Εικόνα 2: Απογραφή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στη ναυτιλία για τα έτη 2012 – 2018 [10]

Όπου *UNCTAD: United Nations Conference on Trade and Development* (Διάσκεψη Ηνωμένων Εθνών για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη)

*EEOI: Energy Efficiency Operational Indicator* (Λειτουργικός δείκτης ενεργειακής απόδοσης)

*AER: Annual Efficiency Rate* (Δείκτης μέτρησης της ετήσιας πυκνότητας της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα)

Από τα δεδομένα της εικόνας 2, είναι εμφανής η μείωση των εκπομπών διοξειδίου το άνθρακα από το 2012, μετά την 4η διάσκεψη του *IMO*.

### 1.3 Πηγές εκπομπών πλοίων

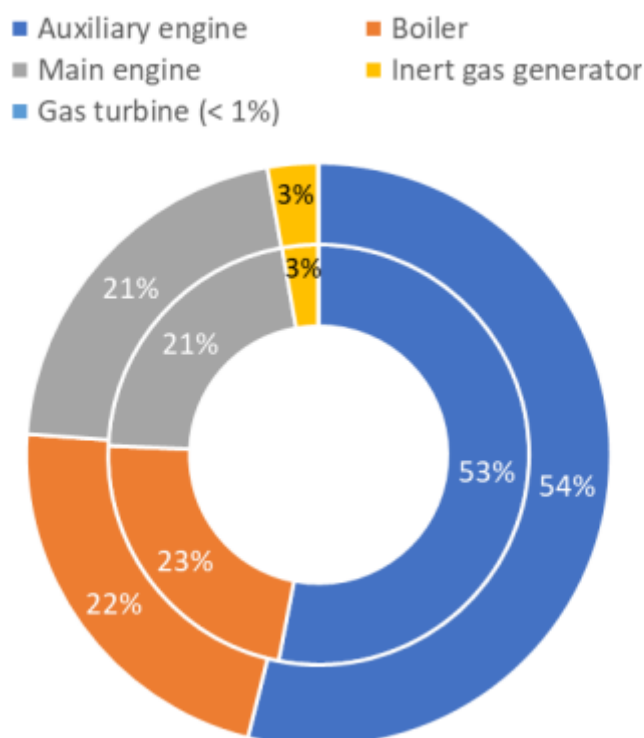
Οι εκπομπές ρύπων από τα πλοία διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες [8]:

- Εκπομπές εξαιτίας της καύσης
- Εκπομπές φορτηγών πλοίων
- Εκπομπές εξαιτίας διαρροής ή ρωγμής εξοπλισμού του πλοίου, ειδικότερα στις περιπτώσεις των ψυκτικών υγρών

Για την καλύτερη οριοθέτηση των άμεσων και έμμεσων εκπομπών ρύπων και βελτίωση της διαφάνειας, καθώς και στην παροχή χρησιμότητας για τους διάφορους διεθνείς οργανισμούς, ορίζονται τρία πεδία για λογιστικούς σκοπούς και σκοπούς αναφοράς.

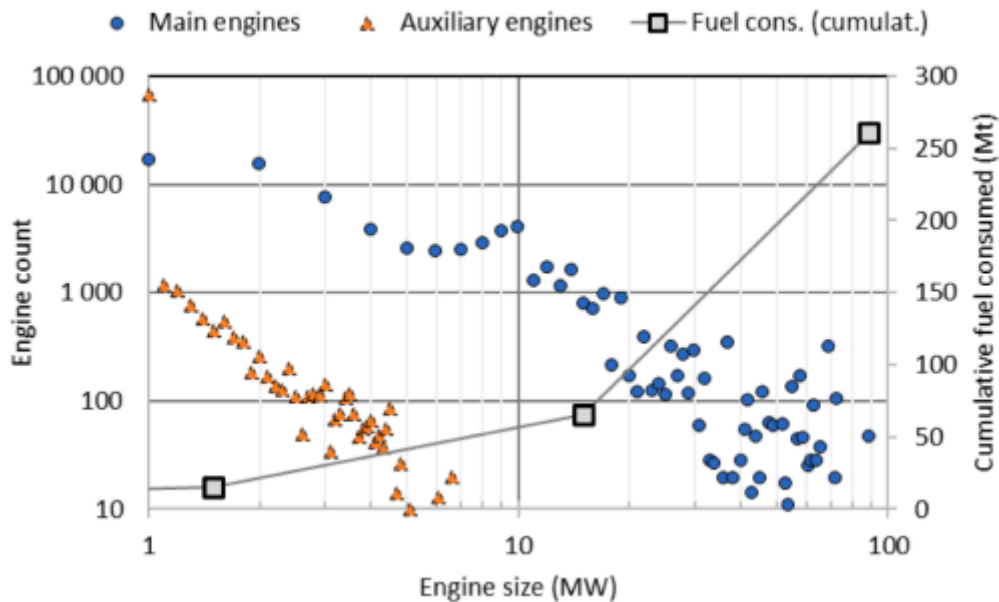
Στο πρώτο πεδίο ανήκουν οι άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της καύσης καυσίμων. Στο δεύτερο πεδίο ανήκουν οι έμμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στο τρίτο πεδίο ανήκουν οι άλλες έμμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [11].

Οι εκπομπές εξαιτίας της καύσης καυσίμων αποτελούν τον κυριότερο παράγοντα εκπομπών ρύπων στη ναυτιλία. Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής σχετικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για τα έτη 2018 και 2019, το μεγαλύτερο μερίδιο των εκπομπών το έχουν οι μηχανές πρόωσης του πλοίου. Στην εικόνα 3 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τύποι εκπομπών για τα έτη 2018 και 2019.



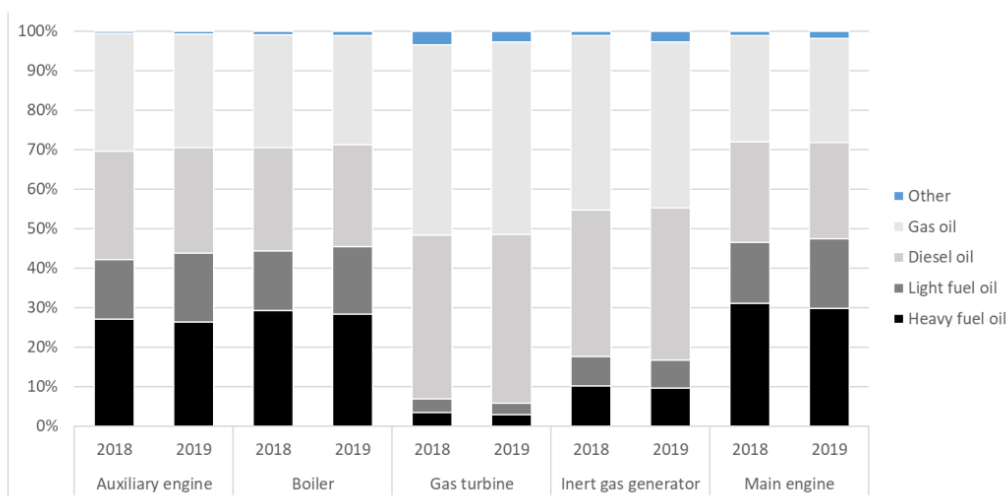
Εικόνα 3: Τύποι εκπομπών ρύπων, ο εσωτερικός κύκλος αφορά το 2018 και ο εξωτερικός το 2019 [12]

Από τα δεδομένα της εικόνας 3, είναι σαφές πως το μεγαλύτερο μερίδιο των άμεσων εκπομπών ρύπων είναι αποτέλεσμα των μηχανών πρόωσης των πλοίων. Το είδος καυσίμου κάθε πλοίου αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο παράγοντα για τις εκπομπές ρύπων, σε συνδυασμό με το μέγεθος τους και το μεταφερόμενο φορτίο.



Εικόνα 4: Η κατανάλωση καυσίμου για τα διαφορετικά μεγέθη μηχανών [13]

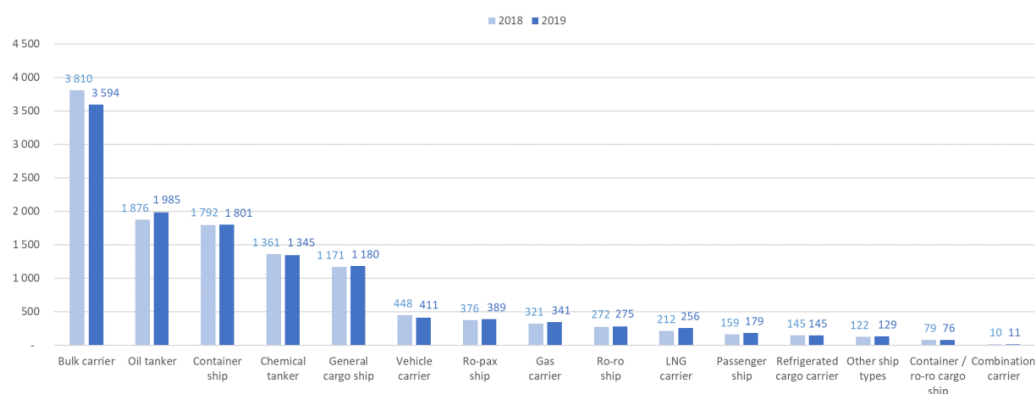
Στην εικόνα 5 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα δεδομένα για τις εκπομπές ρύπων ανάλογα με τον τύπο καυσίμου για τα έτη 2018 και 2019.



Εικόνα 5: Εκπομπές ρύπων ανάλογα με τον τύπο καυσίμου για τα έτη 2018 και 2019 [12]

Στα επόμενα κεφάλαια, θα γίνει εκτενής ανάλυση του εκάστοτε τύπου καυσίμου και της ενεργειακής απόδοσης ανά περίπτωση. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οφείλεται στην καύση *HFO* (*Heavy Fuel Oil*).

Πρέπει να γίνει αναφορά πως οι εκπομπές των στρατιωτικών πλοίων δεν συμπεριλαμβάνονται στις μετρήσεις, καθώς τα δεδομένα που σχετίζονται με τα στρατιωτικά πλοία είναι εμπιστευτικά. Στην εικόνα 6 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα δεδομένα για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά κατηγορία πλοίου, για τα έτη 2018 και 2019.



Εικόνα 6: Αριθμός αναφορών εκπομπών ρύπων στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τα έτη 2018 και 2019 [12]

Το 80% του διεθνούς θαλάσσιου στόλου ανήκει στις κατηγορίες *bulk carriers* (μεταφορά χύδην φορτίου), *oil tankers* (δεξαμενόπλοια μεταφοράς πετρελαίου), *container ships* (φορτηγά πλοία), *chemical tanker* και *general cargo ships* (πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου). Η κατανομή του στόλου άλλαξε μερικώς μετά το 2018, κυρίως με την αύξηση των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (*LNG carriers*) [12].

#### 1.4 Οι κανονισμοί του IMO

Οι πρώτες μελέτες σχετικά με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη και την επίδραση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα

πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1970, αλλά η διεθνής κοινότητα ξεκίνησε να λαμβάνει μέτρα το 1988 με την δημιουργία της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) από τον Διεθνή Μετεωρολογικό Οργανισμό (*World Meteorological Organisation*) και την Επιτροπή Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών (*UNEP*). Το 1990 δημοσιεύτηκαν τα αποτελέσματα των πρώτων μελετών σχετικά με το φαινόμενο της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη (*global warming*) και στη συνέχεια συστάθηκε η Σύμβαση - Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (*United Nations Framework Convention on Climate Change*). Η πρώτη συνεδρίαση της επιτροπής πραγματοποιήθηκε το 1992 στο Ρίο της Βραζιλίας. Η πρώτη σημαντική διεθνής συμφωνία για την προστασία του περιβάλλοντος πραγματοποιήθηκε το 1997 στην Ιαπωνία και έμεινε γνωστή με τον τίτλο «το Πρωτόκολλο του Κιότο» (*Kyoto Protocol*), με σημαντικότερο επίτευγμα τους δεσμευτικούς στόχους για τις 37 βιομηχανικές χώρες για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (*GHG emissions*). Οι λεπτομερείς κανόνες για την εφαρμογή του Πρωτοκόλλου εγκρίθηκαν στο *COP 7*<sup>1</sup> στο Μαρακές το 2001 και ονομάζονται «Συμφωνίες του Μαρακές». Το Πρωτόκολλο του Κιότο τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου 2005. Το Πρωτόκολλο του Κιότο περιέχει διατάξεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή αεροπορία και τη ναυτιλία και αντιμετωπίζει αυτούς τους τομείς με διαφορετικό τρόπο από άλλες πηγές λόγω των παγκόσμιων δραστηριοτήτων τους, δηλαδή μέσω του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (*ICAO*) και του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (*IMO*) αντίστοιχα [14]. Με το Πρωτόκολλο του Κιότο καθιερώθηκε ένα αυστηρό πλαίσιο παρακολούθησης των εκπομπών ρύπων, καθώς και επανεξέτασης και επαλήθευσης των δεδομένων. Επιπλέον, καθιερώνεται ένα σύστημα συμμόρφωσης για τη διασφάλιση της διαφάνειας και την υποχρέωση των μερών να λογοδοτήσουν. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, οι πραγματικές εκπομπές των χωρών πρέπει να παρακολουθούνται και να τηρούνται με ακριβή αρχεία για κάθε είδους μεταφορά που πραγματοποιείται [15].

---

<sup>1</sup> *Conference of the parties*

Το 2008 η υπεύθυνη ομάδα εργασίας που θεσπίστηκε από τον *IMO* ξεκίνησε τις εργασίες για τον καθορισμό των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων μέτρων για την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στις θαλάσσιες μεταφορές. Τον Ιούλιο του 2012, η επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος του *IMO* συνεδρίασε και αποφάσισε για την δημιουργία κανονισμών και μέτρων για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τη ναυτιλία, οι οποίοι θα θέτονταν σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2013. Ειδικότερα, τροποποιήθηκαν οι κανονισμοί της *MARPOL Annex VI* που δημοσιεύτηκαν το 1997 και ως σκοπό είχαν τον περιορισμό των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων που περιέχονται στα καυσαέρια των πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των οξειδίων του θείου και του αζώτου. Η πρώτη αναθεώρηση των κανονισμών *MARPOL Annex VI* έγινε στις 19 Μαΐου του 2005 μετά από συνεδρίαση της επιτροπής *Marine Environment Protection Committee (MEPC)*. Μετά από τρία έτη μελέτης και επανεξέτασης των θεσμικών πλαισίων, δημοσιεύτηκε η αναθεωρημένη έκδοση του παραρτήματος των κανονισμών της *MARPOL*.

Η αναθεώρηση του παραρτήματος VI της Διεθνούς σύμβασης *MARPOL* το 2013 περιελάμβανε μια σειρά από μέτρα, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε τεχνικά και λειτουργικά. Τα **τεχνικά μέτρα** περιλαμβάνουν ένα σύστημα για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης των νέων πλοίων με σημαντικότερο τον σχεδιαστικό δείκτη ενεργειακής απόδοσης *EEDI (Energy Efficiency Design Index)* ενώ τα **λειτουργικά μέτρα** περιλαμβάνουν τις κατευθυντήριες οδηγίες ώστε κάθε νέο πλοίο να περιλαμβάνει τις βέλτιστες πρακτικές. Κάθε νέο πλοίο πρέπει να φέρει ένα σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας (*Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP*).

Η απόφαση για τη μελέτη και ανάπτυξη των κατάλληλων δεικτών για τον έλεγχο των εκπομπών πάρθηκε το 2010 κατά την 60η συνεδρίαση της επιτροπής *MEPC*, όπου εκτός από τους δύο προαναφερθέντες δείκτες, σχεδιάστηκε και η εκούσια χρήση του Λειτουργικού Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας πλοίων (*EEOI*) για νέα και υπάρχοντα πλοία [16].

Ολοκληρώνοντας την ενότητα 1.4 σχετικά με τους κανονισμούς του *IMO*, παρουσιάζονται οι στόχοι και το χρονοδιάγραμμα επίτευξης αυτών έως και το 2050. Αρχικά, το έτος 2023 θα τεθούν σε ισχύ τα μέτρα μείωσης της

συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα και θα ξεκινήσει η συλλογή δεδομένων για τον υπολογισμό του δείκτη *CII*<sup>2</sup>. Ως το 2030 πρέπει να μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 40% συγκριτικά με το επίπεδο του 2008, ενώ έως το 2050 η αντίστοιχη μείωση πρέπει να φτάσει το 70%. Επιπλέον, έως το 2050 οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία πρέπει να μειωθούν κατά 50% σε σχέση με το 2008, με απώτερο στόχο τις μηδενικές εκπομπές το 2100.

Το χρονοδιάγραμμα εφαρμογής μέτρων ενεργειακής απόδοσης είναι το ακόλουθο:

- Το 2013 άνω του 90% του παγκόσμιου στόλου ήταν υποχρεωμένο στην εφαρμογή κανονισμών ενεργειακής απόδοσης και τήρησης του δείκτη *EEDI*
- Το 2014 εγκρίθηκε η τρίτη μελέτη του *IMO* για τα αέρια του θερμοκηπίου
- Το 2015 συμφωνήθηκαν οι στόχοι για τα νέα πλοία, όσον αφορά την ενεργειακή τους απόδοση
- Το 2016 έγινε υποχρεωτική η συλλογή δεδομένων για την κατανάλωση καυσίμου για πλοία άνω του 5.000gt
- Το 2018 υιοθετήθηκε από τον *IMO* η στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία
- Το 2020 η ενεργειακή απόδοση των νέων πλοίων βελτιώθηκε κατά 10%
- Το 2023 ξεκινά η συλλογή δεδομένων για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα
- Έως το 2025, η ενεργειακή απόδοση των νέων πλοίων θα πρέπει να έχει βελτιωθεί κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα που θεσπίστηκαν το 2015
- Έως το 2030, η ενεργειακή απόδοση των νέων πλοίων θα πρέπει να έχει βελτιωθεί κατά 30% σε σχέση με τα επίπεδα που θεσπίστηκαν το 2015.

---

<sup>2</sup> Carbon intensity indicator



- Έως το 2050, θα πρέπει να μειωθούν κατά 50% οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα<sup>3</sup> [17]

## 1.5 Εισαγωγή στον δείκτη EEDI & ιστορική εξέλιξη αυτού

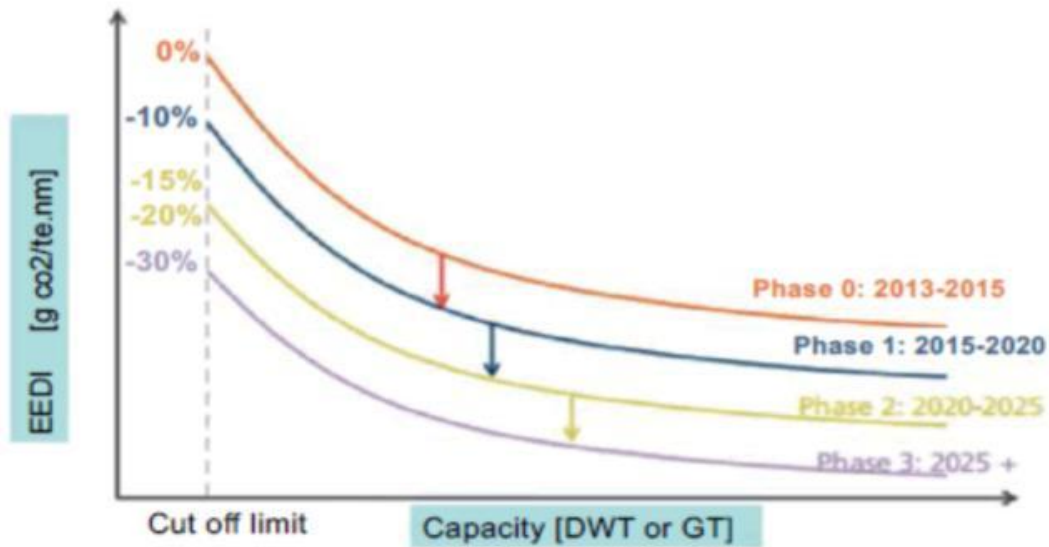
### 1.5.1 Γενικά

Ο δείκτης *EEDI* θεσπίστηκε από τον *IMO* το 2011 μετά από τις συνεδριάσεις της επιτροπής *MEPC* και αποτελεί το πρώτο δεσμευτικό μέτρο σχετικά με την προστασία του κλίματος και του φυσικού περιβάλλοντος. Σε πρώτη φάση, το μειονέκτημά του ήταν πως ήταν δεσμευτικός μόνο για τα νέα πλοία. Ο σκοπός του σχεδιασμού του δείκτη *EEDI* ήταν η ανάλυση και βελτιστοποίηση των κινητήρων των πλοίων, της σχεδίασης της γάστρας, του συστήματος πρόωσης και των πιθανών επιλογών χρήσης μη ορυκτών καυσίμων. Με την εφαρμογή του δείκτη *EEDI*, διασφαλίζεται πως τα νέα πλοία σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ενεργειακά αποδοτικά, ενώ ταυτόχρονα καθορίζεται το ανώτερο όριο επιτρεπόμενων εκπομπών γραμμαρίων  $CO_2$  ανά μεταφορική ικανότητα ναυτικών μιλίων.

Η πρώτη φάση εφαρμογής του δείκτη για τα νέα πλοία ονομάστηκε *phase 0* και αφορά την χρονική περίοδο 2013 - 2015, η επόμενη φάση εφαρμογής, η *phase 1* αφορά την χρονική περίοδο 2015 - 2020, η επόμενη φάση, *phase 2* αφορά την χρονική περίοδο 2020 - 2025 και η τέταρτη φάση, η *phase 3* αφορά τα πλοία κατασκευής μετά το έτος 2025. Στην εικόνα που ακολουθεί, αποτυπώνεται η απαιτούμενη εξέλιξη της μείωσης των εκπομπών  $CO_2$ .

---

<sup>3</sup> Μετρούμενοι σε *tonne/km*



Εικόνα 7: Η χρονική εξέλιξη της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά φάση εφαρμογής σε σχέση με τη χωρητικότητα των νέων πλοίων [18]

Στον πίνακα 2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα όρια μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά τύπο πλοίου σε όλες τις φάσεις εφαρμογής του δείκτη. Στις περιπτώσεις όπου υπάρχει η τιμή *n/a* σημαίνει πως δεν απαιτείται η εφαρμογή του δείκτη για την πρώτη φάση εφαρμογής.

Πίνακας 2: Ποσοστό μείωσης των εκπομπών για κάθε κατηγορία πλοίου ανά φάση εφαρμογής του δείκτη *EEDI* [18]

Ship Type	Size	Phase 0	Phase 1	Phase 2	Phase 3
		1 Jan 2013- 31 Dec 2014	1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	1 Jan 2025 and onwards
Bulk carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 DWT and above	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Gas carrier	10,000 DWT and above	0	10	20	30
	2,000-10,000DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Tanker	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Container ship	15,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
General Cargo ships	15,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000-15,000DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Refrigerated cargo carrier	5,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000-5,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Combination carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000-20,000DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
LNG carrier***	10,000 DWT and above	n/a	10**	20	30
Ro-Ro cargo ship (vehicle carrier)***	10,000 DWT and above	n/a	5**	15	30
Ro-Ro cargo ship***	2,000 DWT and above	n/a	5**	20	30
	1,000-2,000 DWT	n/a	0-5*, **	0-20*	0-30*
Ro-Ro passenger ship***	1000 DWT and above	n/a	5**	20	30
	250-1,000 DWT	n/a	0-5*, **	0-20*	0-30*
Cruise passenger ship*** having non-conventional propulsion	85,000 GT and above	n/a	5**	20	30
	25,000-85,000 GT	n/a	0-5*, **	0-20*	0-30*

### 1.5.2 Τύπος υπολογισμού του δείκτη *EEDI*

Το μοντέλο υπολογισμού του δείκτη που τέθηκε σε ισχύ το 2013 δίνεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$EEDI = \frac{P \cdot SFC \cdot C_f}{DWT \cdot V_{ref}} \quad (1)$$

όπου:

*P*: το 70% της μέγιστης ισχύος των κινητήρων του πλοίου (κύριων μηχανών και μηχανών πρόωσης) σε *kW*.

*SFC* (*specific fuel consumption*): ειδική κατανάλωση καυσίμου, μονάδα μέτρησης *g/kWh*.

*C<sub>f</sub>*: συντελεστής εκπομπών καυσίμου (οι τιμές του οποίου παρουσιάζονται στην εικόνα 8)

*DWT* (*dead weight tonnes*): χωρητικότητα του πλοίου σε τόνους (νεκρό φορτίο)

*V<sub>ref</sub>*: ταχύτητα του πλοίου σε ναυτικούς κόμβους

Type of fuel	Reference	Carbon Content	$C_F$ (t-CO <sub>2</sub> /t-Fuel)
Diesel / Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX through DMB	0.8744	3.206
Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0.8594	3.151
Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0.8493	3.114
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	0.8182	3.000
	Butane	0.8264	3.030
Liquefied Natural Gas (LNG)		0.7500	2.750
Methanol		0.3750	1.375
Ethanol		0.5217	1.913

Εικόνα 8: Τιμές του συντελεστή  $C_f$  [18]

Για κάθε τύπο πλοίου ορίζεται η γραμμή αναφοράς<sup>4</sup> για τον δείκτη *EEDI*, ο οποίος υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\text{The reference EEDI} = a \cdot b^{-c} \quad (2)$$

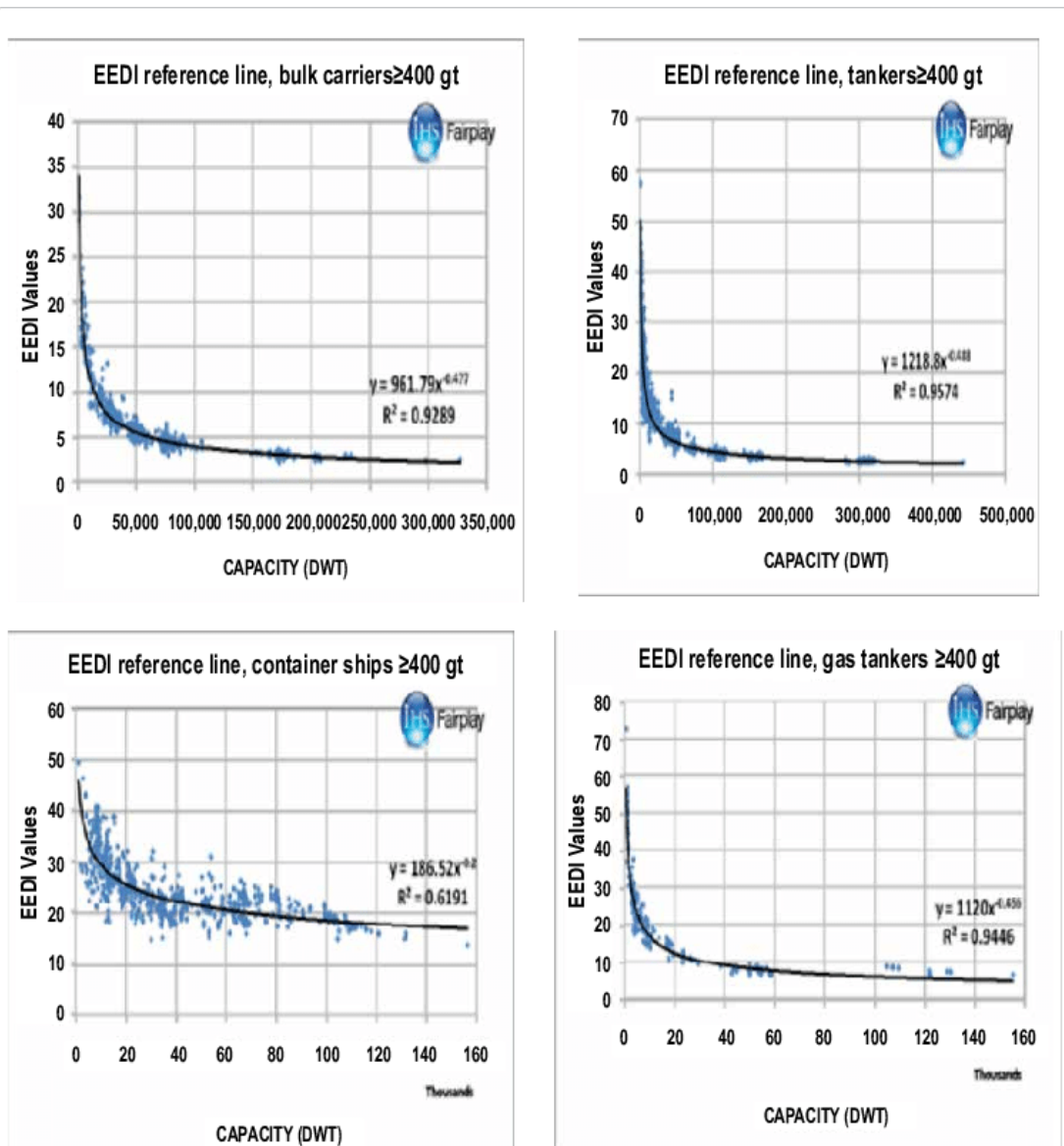
όπου οι τιμές των μεταβλητών  $a$ ,  $b$ ,  $c$  προέρχονται από τη βάση δεδομένων του βρετανικό νηογνώμονα *Lloyd's Register* και παρουσιάζονται στον πίνακα 3 που ακολουθεί [19].

<sup>4</sup> The Reference EEDI

Πίνακας 3: Τιμές των μεταβλητών *a*, *b*, *c* [19]

Τύπος πλοίου	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
<i>Bulk carrier</i>	961,79	<i>DWT</i>	0,477
<i>Gas tanker</i>	1120	<i>DWT</i>	0,456
<i>Tanker</i>	1218,8	<i>DWT</i>	0,488
<i>Container</i>	174,22	<i>DWT</i>	0,201
<i>General cargo</i>	107,48	<i>DWT</i>	0,216
<i>Refrigerated cargo carrier</i>	227,01	<i>DWT</i>	0,244
<i>Combination carrier</i>	1219	<i>DWT</i>	0,488
<i>Ro-Ro cargo ship</i>	1405,15	<i>DWT</i>	0,498
<i>Ro-Ro passenger</i>	752,16	<i>DWT</i>	0,381
<i>LNG carrier</i>	2253,7	<i>DWT</i>	0,474
<i>Cruiser passenger ship (having non conventional propulsion)</i>	170,84	<i>GRT</i>	0,214

Ουσιαστικά, η εφαρμογή του δείκτη *EEDI* είναι ο λόγος της επίδρασης του συνόλου της ναυτικής δραστηριότητας στο περιβάλλον προς τα οφέλη που αποκομίζει η κοινωνία από τη ναυτιλία. Για την εφαρμογή του κανονισμού, αρχικά, υπολογίζεται ο απαιτούμενος δείκτης (*required EEDI*), ο οποίος αποτελεί το ρυθμιστικό όριο για το εκάστοτε πλοίο και στη συνέχεια, ο υπολογισμός του επιτυγχάνεται με τη χρήση «γραμμών αναφοράς» και των αντίστοιχων «συντελεστών μείωσης», όπου η «γραμμή αναφοράς» αποτελεί τη βάση του δείκτη αναφοράς και είναι συνάρτηση του μεγέθους του πλοίου.



Εικόνα 9: Τιμή του reference *EEDI* συναρτήσει της χωρητικότητας του πλοίου[20]

Παρατηρώντας την εικόνα 9, είναι σαφές πως η κατηγορία πλοίων με τη μεγαλύτερη διασπορά τιμών του δείκτη *EEDI* σε σχέση με τη γραμμή αναφοράς είναι αυτή των *containers*, ενώ, όπως ήταν αναμενόμενο, η σχέση που συνδέει τη χωρητικότητα με την τιμή του δείκτη είναι «σχετικά» αντιστρόφως ανάλογη, καθώς με την αύξηση της χωρητικότητας μειώνονται οι τιμές του δείκτη.

### 1.5.3 Δομή του δείκτη *EEDI*

Ο δείκτης διακρίνεται σε Δείκτη Σχεδιασμού Επιτευχθείσας Ενεργειακής Απόδοσης (*attained EEDI*) και στον Δείκτη Σχεδιασμού Απαιτούμενης Ενεργειακής Απόδοσης (*required EEDI*), όπου οι δύο δείκτες συνδέονται μεταξύ τους με την ακόλουθη σχέση:

$$Attained EEDI \leq Required EEDI = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot The Reference EEDI \quad (3)$$

όπου  $X$  είναι ο συντελεστής μείωσης και η αντίστοιχη τιμή του εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, το μέγεθός του και το έτος κατασκευής του, ενώ οι τιμές δίνονται από τον Πίνακα 2.

Αναλύοντας την εξίσωση (1) για κάθε τύπο πλοίου, προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τον καθορισμό του δείκτη *EEDI*:

$$EEDI = \frac{1}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \cdot \left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \cdot \left( \sum_{l=1}^{nME} P_{ME(l)} \cdot Cf_{ME(l)} \cdot SFC_{ME(l)} \right) + (P_{AE} \cdot Cf_{AE} \cdot SFC_{AE}) + \left[ \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{l=1}^{nPTI} P_{PTI(l)} - \sum_{i=1}^{\eta_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}} \right) \cdot Cf_{AE} \cdot SFC_{AE} \right] - \sum_{i=1}^{\eta_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot Cf_{ME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right\} \quad (4)$$

Ακολουθεί παρουσίαση / επεξήγηση των παραπάνω συμβόλων [20]:

- $P$ : η ισχύς σε  $kW$  και διακρίνεται σε ισχύ των κύριων μηχανών και των βοηθητικών μηχανών. ( $ME$ : κύριες μηχανές,  $AE$ : βοηθητικές μηχανές)
- $P_{ME(i)}$ : αναφέρεται ως το 75% της εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος ( $MCR$ ) για κάθε κύρια μηχανή (από τον υπολογισμό εξαιρούνται ροές ισχύος σε εγκατεστημένες γεννήτριες άξονα). Η ισχύς κάθε κύριας μηχανής που αφορά την πρόωση του πλοίου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{ME(i)} = 0,75(MCR_{ME(i)} - P_{PTO(i)}) \quad (5)$$



όπου  $MCR_{ME(i)}$  ορίζεται η μέγιστη συνεχής ισχύς της κύριας μηχανής και  $P_{PTO(i)}$  ορίζεται το 75% της εγκατεστημένης ισχύος κάθε γεννήτριας άξονα διαιρεμένο με το βαθμό απόδοσης της εκάστοτε γεννήτριας.

- $P_{AE}$  : η απαιτούμενη ισχύς των βοηθητικών μηχανημάτων, όπου στον υπολογισμό της συμπεριλαμβανομένης της απαραίτητης ισχύος για τα μηχανολογικά συστήματα πρόωσης, καθώς και για την ενδιαίτηση, ενώ δεν συμπεριλαμβάνεται η απαιτούμενη για πρόωση ισχύ. Ο ακριβής υπολογισμός της γίνεται με βάση τον ηλεκτρολογικό ισολογισμό του πλοίου, όμως, επειδή συνήθως δεν υπάρχουν ακριβή διαθέσιμα στοιχεία ο *IMO* προτείνει δύο μαθηματικούς τύπους που προέρχονται από πειραματικές διαδικασίες:

$$\text{➤ } 0,025 \cdot MCR + 250, \text{ όταν } MCR \geq 10.000kW \quad (6)$$

$$\text{➤ } 0,05 \cdot MCR, \text{ όταν } MCR < 10.000kW \quad (7)$$

- $P_{PTI(i)}$  (*Propulsion Power Take in*): ορίζεται η παρεχόμενη ισχύς στον άξονα κίνησης από ένα βοηθητικό κινητήρα και ισούται με το 75% της ονομαστικής ισχύος κάθε κινητήρα διαιρεμένο με το βαθμό απόδοσης κάθε γεννήτριας
- $P_{eff(i)}$  : ορίζεται ως το 75% της μείωσης ισχύος της κύριας μηχανής λόγω της καινοτόμου ενεργειακά αποδοτικής μηχανολογικής τεχνολογίας

### Αδιάστατοι παράμετροι

- $f_j$  : αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης για πλοία που ανήκουν στην κατηγορία ειδικού σχεδιασμού. Για τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς (*shuttle tankers*) με *DWT* μεταξύ 80.000 και 160.000 τόνων λαμβάνεται ίσος με 0,77. Στην ειδική κατηγορία ανήκουν και τα πλοία κατηγορίας «ice». Για τα λοιπά πλοία η τιμή του ισούται με τη μονάδα
- $f_w$ : αδιάστατος συντελεστής που δείχνει τη μείωση της ταχύτητας σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες, ύψους κύματος, συχνότητας, κυμάτων και ανέμου
- $f_{eff(i)}$ : συντελεστής διαθεσιμότητας της κάθε καινοτόμου τεχνολογίας ενεργειακής αποδοτικότητας

- *fi*: αδιάστατος συντελεστής χωρητικότητας (*capacity*) που αφορά οποιοδήποτε τεχνικό / ρυθμιστικό περιορισμό στη χωρητικότητα και πρέπει να λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, όταν η αναγκαιότητα του παράγοντα δεν είναι δεδομένη [20]

## Κεφάλαιο 2. Ενεργειακή αποδοτικότητα πλοίου

### 2.1 Γενικά

Το ζήτημα της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου είναι σύνθετο και δύναται να προσεγγιστεί από διάφορες σκοπιές, όπως έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 1. Από το έτος 2013, τα νέα πλοία είναι υποχρεωμένα να έχουν εγκατεστημένο στο πλοίο το σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας (*Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP*). Η ενεργειακή απόδοση του πλοίου σχετίζεται άμεσα και έμμεσα με οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και τεχνικούς παράγοντες.

Τη δεκαετία 2008 – 2018, η ενεργειακή απόδοση των νέων πλοίων που κατασκευάζονταν βελτιώθηκε κατά 30% σε σχέση με τα προηγούμενα έτη [21], όμως, παρ' όλα αυτά οι ερευνητές συνεχίζουν να αναζητούν τρόπους περαιτέρω βελτίωσης, ώστε να επιτύχουν τους στόχους του *IMO* σχετικά με τα αέρια του θερμοκηπίου.

Οι δύο πιο διαδεδομένοι και διεθνώς αποδεκτοί ορισμοί για την ενεργειακή απόδοση είναι οι ακόλουθοι:

*Annual efficient ratio (AER)*: που αποτελεί ένα προσεγγιστικό μέτρο του φορτίου που μεταφέρεται, χρησιμοποιώντας την σχεδιασμένη χωρητικότητα νεκρού φορτίου του πλοίου και στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται πως το πλοίο είναι συνεχώς πλήρως φορτωμένο. Ουσιαστικά, αποτελεί ένα μέτρο της προσφοράς της ναυτιλιακής ικανότητας. Δίνεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση [20]:

$$AER = \frac{\sum_i C_i}{\sum_i (dwt \cdot D_i)} \quad (8)$$

όπου  $C_i$  ορίζονται οι εκπομπές άνθρακα και υπολογίζονται από το γινόμενο της κατανάλωση καυσίμου και του αντίστοιχου συντελεστή  $C_f$  (αδιάστατο μέγεθος, οι τιμές του δίνονται στον πίνακα 8) και  $D_i$  η απόσταση που διανύει το πλοίο σε ναυτικά μίλια.

*Energy efficiency operator indicator (EEOI)*: αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο παρακολούθησης της ενεργειακής απόδοσης και συνδέεται άμεσα με τον *EEDI*. Προσφέρει τη δυνατότητα στα αρμόδια μέλη του πληρώματος να μετρούν την απόδοση του καυσίμου, ενώ το πλοίο είναι σε λειτουργία, οπότε γίνεται άμεση καταγραφή των επιπτώσεων κάθε διαφορετικής κατάστασης που δύναται να επηρεάσει τη λειτουργία του πλοίου. Η μέτρηση της ενεργειακής απόδοσης διακρίνεται σε τεχνολογική και λειτουργική.

## **2.2 Τεχνολογικά μέτρα για την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας**

Η απόδοση ενός πλοίου μπορεί συχνά να βελτιωθεί με την εκ των υστέρων τοποθέτηση τεχνολογιών ενεργειακής απόδοσης. Για πλοία πλήρους μπλοκ όπως δεξαμενόπλοια και πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, πολλά έργα μετασκευής με *PID*<sup>5</sup> (συσκευές βελτίωσης πρόωσης), τελικά, σε συνδυασμό με μετασκευή βελτιστοποιημένης προπέλας, έχουν παρουσιάσει βελτιώσεις 5% στη ζήτηση ισχύος.

Τα τεχνολογικά μέτρα για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων επικεντρώνονται κατά κύριο λόγο στη σχεδίαση του πλοίου, τα καύσιμά του, την ενεργειακή του κατανάλωση και τα λειτουργικά μέτρα του πλοίου. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες και μέθοδοι λειτουργίας με γνώμονα αυτούς τους τομείς, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση των υφιστάμενων και μελλοντικών πλοίων.

### **2.2.1 Σχεδιαστικά μέτρα για την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας**

Ο σχεδιασμός του πλοίου διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, καθώς αποτελεί θεμέλιο για την αποδοτική πλεύση. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου επιτυγχάνεται με χρήση

---

<sup>5</sup> *Propulsion improving devices*

υψηλούς απόδοσης κινητήρες και βελτιωμένη σχεδίαση της γάστρας ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ροή γύρω από τη γάστρα. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η χρήση προεξέχων βολβώδους τόξου (*bulbous bow*) στην πλώρη του πλοίου ώστε να μειωθούν οι αντιστάσεις κατά την πλεύση και να αυξηθεί η ταχύτητα του πλοίου.

Τα τεχνολογικά μέτρα μείωσης των ενεργειακών απωλειών βελτιώνουν σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, με ένα από αυτά να αποτελεί η εγκατάσταση συστήματος ανάκτησης ενέργειας στην προπέλα του πλοίου. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από έναν στάτορα που τοποθετείται στο σύστημα της προπέλας ώστε να ανακατευθύνει τη ροή. Βέβαια με την εγκατάσταση αυτή αυξάνονται οι αποσβέσεις λόγω τριβής. Στην εικόνα 10 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια τέτοια εγκατάσταση.



Εικόνα 10: Εγκατάσταση στάτορα στην προπέλα πλοίου για βελτίωση της απόδοσης[23]

Τα σημαντικότερα τεχνολογικά μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας αφορούν τη σχεδίαση του πλοίου και σύμφωνα με στοιχεία του *IMO* υπάρχουν περιπτώσεις όπου ένα πλοίο καταναλώνει έως και 30% περισσότερα καύσιμα εξαιτίας μη βέλτιστης σχεδίασης της γάστρας και του συστήματος πρόωσης. Στην περίπτωση που δεν είναι βέλτιστα σχεδιασμένες οι δεξαμενές έρματος, παρατηρείται απώλεια ενέργειας, ενώ η ελαχιστοποίηση των αντιστάσεων, χάρη στην βελτιστοποίηση της διαγωγής του πλοίου, αποτελεί ένα επιπλέον τεχνολογικό μέτρο βελτίωσης της

ενεργειακής απόδοσης. Ένα άλλο τεχνολογικό μέτρο που είναι αρχικά σε πειραματικό στάδιο είναι η χρήση του αέρα ως λιπαντικό με σκοπό τη μείωση των τριβών και των αντιστάσεων. Επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση συστήματος παροχής αέρα κάτω από τη γάστρα και σύμφωνα με μελέτες επιτυγχάνεται μείωση της δύναμης αντίστασης κατά 5 - 15%, γεγονός που συμβάλλει σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου έως και 8% [24]. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο δημιουργούνται φυσαλίδες αέρα, οι οποίες καλύπτουν τη γάστρα του πλοίου. Οι έξοδοι των φυσαλίδων βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία συμμετρικά της ισάλου, η παροχή αέρα είναι σταθερή και επομένως, είναι συνεχής η κάλυψη της γάστρας. Το πρώτο τέτοιο σύστημα που κατασκευάστηκε είναι το *MALS (Mitsubishi air lubrication system)*. Στην εικόνα 11 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η λειτουργία του συστήματος λίπανσης με χρήση του αέρα. Τέλος, οι κύριες διαστάσεις του πλοίου (μήκος, πλάτος, βάθος και βύθισμα) αποτελούν το σημαντικότερο κομμάτι της ενεργειακά αποδοτικής σχεδίασης.



Εικόνα 11: Σύστημα χρήσης του αέρα ως λιπαντικό [25]

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης επιτυγχάνεται με τη μείωση των αντιστάσεων της γάστρας, η οποία οδηγεί σε μείωση της απαιτούμενης ισχύος για την πρόωση. Τα νέα πλοία σχεδιάζονται με γάστρες τύπου *slender*, οι οποίες επιτυγχάνουν μικρότερο συντελεστή γάστρας  $C_b$  (*block coefficient*). Στην εικόνα 12 που ακολουθεί, παρουσιάζονται στοιχεία για τη μέση απαιτούμενη ισχύ για συμβατικά σχεδιασμένο πλοίο με  $C_b = 0,82$  σε σχέση με πλοίο σχεδίασης *slender*, δηλαδή λεπτόγραμμου πλοίου στην πλώρη που

αναπτύσσει μεγάλες ταχύτητες, με  $C_b = 0,75$ . Η σύγκριση πραγματοποιείται για τρεις διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

$$C_b = \frac{V}{L \cdot B \cdot D} \quad (9)$$

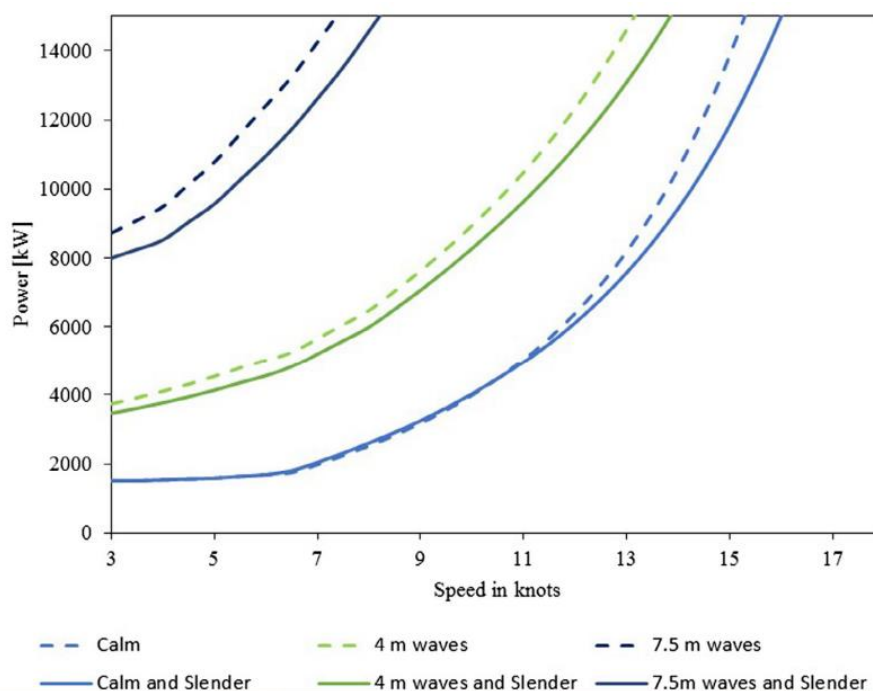
όπου:

$V$ : ο όγκος εκτοπίσματος των υφάλων

$L$ : το μήκος της ισάλου

$B$ : το πλάτος της κατασκευής

$D$ : το μέσο βύθισμα



Εικόνα 12: Σύγκριση απαιτούμενης ισχύος για συμβατικό πλοίο σε σχέση με πλοίο σχεδίασης *slender* [26]

Παρατηρώντας την εικόνα 12 καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Σε ιδανικές καιρικές συνθήκες όπου τα νερά είναι ήρεμα, σε ταχύτητες έως 5 κόμβων δεν παρατηρούνται διαφορές στην απαιτούμενη ισχύ για τα δύο είδη γάστρας. Η εμφανής διαφορά παρατηρείται σε ταχύτητες άνω των 13 κόμβων, όπου η απαιτούμενη ισχύς είναι μικρότερη για πλοία με λεπτή γάστρα.
2. Σε καιρικές συνθήκες όπου το ύψος των κυμάτων φτάνει έως και τα 4 μέτρα, η λεπτή σχεδίαση απαιτεί μικρότερη ισχύ σε όλο το φάσμα των ταχυτήτων.

3. Σε δύσκολες καιρικές συνθήκες όπου επικρατούν κύματα ύψους 7,5 μέτρων, η υπεροχή της λεπτής σχεδίασης είναι σημαντική από τις χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας.

### 2.2.2. Συστήματα ανάκτησης απωλειών θερμότητας

Η ενεργειακή απόδοση βελτιώνεται και με την εγκατάσταση συστημάτων ανάκτησης απωλειών θερμότητας (*waste heat recovery systems*). Τα συγκεκριμένα συστήματα ανακτούν τη θερμική ενέργεια από τα καυσαέρια και ένα μέρος της το μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια και ένα άλλο χρησιμοποιείται για υπηρεσίες του πλοίου, όπως παροχή ζεστού νερού ή ατμούς. Με την εγκατάσταση και χρησιμοποίηση τέτοιων συστημάτων επιτυγχάνονται επιπλέον και οι στόχοι μείωσης των εκπομπών ρύπων. Στην περίπτωση που είναι εγκατεστημένα συστήματα μείωσης εκπομπών ρύπων, όπως *SCR*<sup>6</sup> και *EGR*<sup>7</sup>, η συνολική ποσότητα των καυσαερίων είναι μικρότερη, γεγονός που καθιστά μικρότερη τη διαθέσιμη θερμότητα που δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί. Βέβαια, σε αυτές τις περιπτώσεις, η ενεργειακή αποδοτικότητα επιτυγχάνεται από την βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου. Τα συστήματα ανάκτησης απωλειών θερμότητας λειτουργούν σε διάφορες θερμοκρασίες και το εύρος των θερμοκρασιών διακρίνεται σε:

- a) θερμοκρασίες μικρότερες των 230°C ,
- b) θερμοκρασίες μεταξύ 230°C και 650°C και
- c) σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 650°C.

Κάθε ένα από τα συστήματα ανάκτησης απωλειών θερμότητας λειτουργεί σε καθορισμένες θερμοκρασίες [27]. Αυτά τα συστήματα εφαρμόζονται σε όλα τα πλοία ανεξαρτήτως μεγέθους, ηλικίας και τύπου, με κατώτερο όριο, όμως, εφαρμογής κινητήρες ισχύος 10MW. Τα συστήματα *WHR* χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες και διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες [28]:

1. *Turbocharger*
2. *Economizer*
3. *Steam turbine generator*
4. *Fresh water generator*

---

<sup>6</sup> *Selective catalytic reduction reactors*

<sup>7</sup> *Exhaust gas recirculation*



## 5. *Shaft generator*

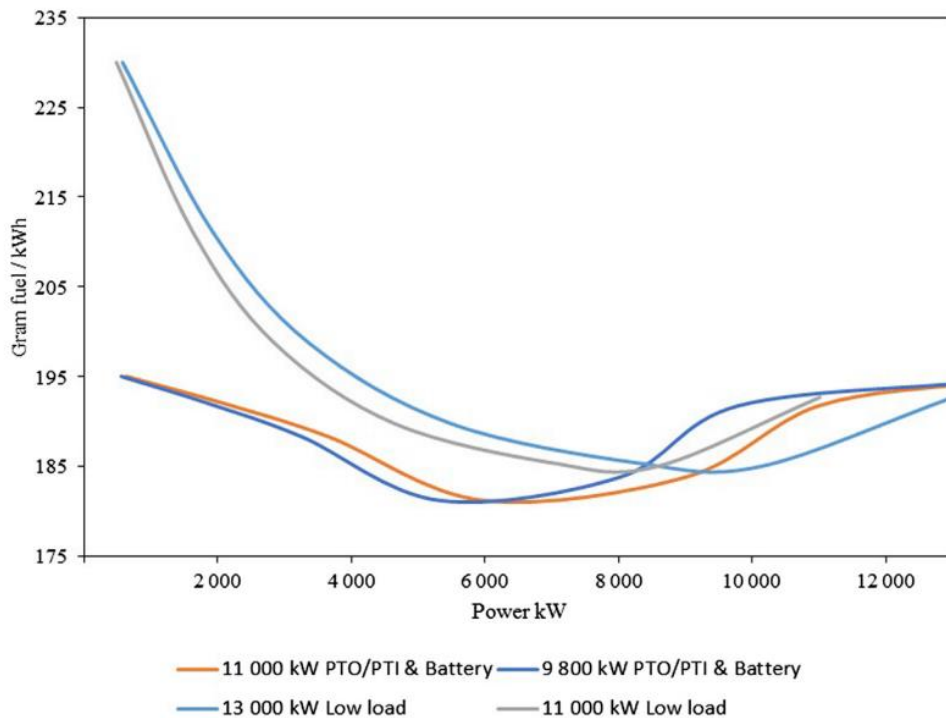
Η ανάπτυξη και βελτίωση των παραπάνω τεχνολογιών αποτελεί σημαντικό βήμα προς τη βελτίωση των τιμών του *EEDI*.

### 2.2.3 Χρήση εναλλακτικών καυσίμων

Τα εναλλακτικά καύσιμα αποτελούν ένα νέο και πολύ σημαντικό πεδίο βελτίωσης των τιμών του *EEDI*. Υπάρχουν μερικά υγρά καύσιμα, όπως η χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου - *LNG*, βιοαέριο *biogas*, μεθανόλη, συνθετικό ντίζελ (*synthetic diesel*) και ο διμεθυλαιθέρας (*dimethyl ether*) που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν το ντίζελ. Από τα ανωτέρω εναλλακτικά καύσιμα, μόνο το *LNG* χρησιμοποιείται σε ευρύτερη κλίμακα, ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται σε διάφορα στάδια μελέτης, ανάπτυξης και πιλοτικής λειτουργίας. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες σαν καύσιμο για τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, ενώ τη τελευταία δεκαετία χρησιμοποιείται και από άλλες κατηγορίες πλοίων και αποτελεί ένα μέτρο μείωσης του *EEDI* [29].

### Ηλεκτροπρόωση

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μια σημαντική εναλλακτική για την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας με κυριότερα συστήματα που εφαρμόζονται να είναι υβριδικού τύπου. Στην εικόνα 13 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ δύο δεξαμενόπλοιων κατηγορίας *Aframax*, όπου η απαιτούμενη ισχύς των κύριων μηχανών είναι  $13.000\text{ kW}$ . Στην περίπτωση της υβριδικής πρόωσης, η ισχύς των κύριων μηχανών είναι  $11.000\text{ kW}$  και μέσω ηλεκτρικής γεννήτριας προσφέρονται τα  $2.000\text{ kW}$ .



Εικόνα 13: Συγκριτική κατανάλωση καυσίμου σε όλο το φάσμα λειτουργίας των κύριων κινητήρων δύο δεξαμενόπλοιων *Aframax* [26]

Παρατηρώντας την εικόνα 13, συμπεραίνουμε πως όταν η απαιτούμενη ισχύς είναι μικρότερη από  $8.500\text{kW}$ , η υβριδική πρόωση επιτυγχάνει σημαντικά μικρότερη κατανάλωση καυσίμου.

### Λοιπά εναλλακτικά καύσιμα

Γενικότερα, τα εναλλακτικά καύσιμα αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα σημεία μελέτης και έρευνας, καθώς συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών  $\text{CO}_2$ . Στην περίπτωση των βιοκαυσίμων, μετά από μελέτη του νηογνώμονα *Lloyd's Register* προέκυψε το συμπέρασμα πως το όφελος χρήσης τους είναι οριακά οικονομικότερο έναντι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και υδροποιημένου φυσικού αερίου. Όμως, τα εμπόδια που προκύπτουν κυρίως λόγω της επαρκούς προμήθειάς τους, καθιστούν τη χρήση τους μη ανταγωνιστική. Από τα εναλλακτικά καύσιμα μόνο το *bio-diesel* έχει ενεργειακή πυκνότητα που προσεγγίζει την αντίστοιχη τιμή του *diesel*, καθώς το υδρογόνο, η μεθανόλη και η αμμωνία έχουν σημαντικά μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα. Το υδρογόνο ως καύσιμο έχει το πλεονέκτημα στο

μέλλον να είναι ένα καύσιμο με μηδενικές εκπομπές ρύπων, προερχόμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο μέλλον, η παραγωγή υγρού υδρογόνου θα αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που θα ενισχύσει τη χρήση του στη ναυτιλία. Όμως, το σημαντικό μειονέκτημά του είναι ο απαιτούμενος όγκος των δεξαμενών, εξαιτίας της χαμηλής του ενεργειακής πυκνότητας. Επιπλέον, το υδρογόνο έχει σημείο τήξης τους  $-253^{\circ}\text{C}$  με αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση ενισχυμένων μονωτικών υλικών στις δεξαμενές αποθήκευσης σε συνδυασμό με διαρθρωτικές ρυθμίσεις. Επίσης, το υδρογόνο είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο, οπότε τίθενται σημαντικά ζητήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια. Στην περίπτωση της αμμωνίας, το πλεονέκτημα είναι πως αποτελεί μια χημική ένωση, η οποία αποτελεί μια από τις τρεις πιο διαδεδομένες μεταφερόμενες χημικές ενώσεις, με αποτέλεσμα να υπάρχει ήδη μια παγκόσμια υποδομή σχετικά με τη μεταφορά και την αποθήκευσή της. Όμως, το πλέον σημαντικό της μειονέκτημα αποτελεί η τοξικότητα και η επίδρασή της στο φυσικό περιβάλλον σε περίπτωση κάποιου ατυχήματος.

### **Κυψέλες καυσίμου**

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες τεχνολογικές λύσεις, καθώς είναι ενεργειακά αποδοτικές και δεν έχουν το ίδιο επίπεδο εκπομπών ρύπων με το ντίζελ. Το σύστημα των κυψελών καυσίμου χρησιμοποιείται στα υποβρύχια εδώ και δεκαετίες, ενώ η πρώτη κυψέλη καυσίμου κατασκευάστηκε το 1839 από τον *William Grove*[30]. Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν απευθείας την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, παραλείποντας το ενδιάμεσο βήμα της μηχανικής ενέργειας. Η απουσία εκτεταμένων υψηλών θερμοκρασιών μειώνουν τις εκπομπές  $\text{NO}_x$ . Ο συνδυασμός ενός συστήματος κυψελών καυσίμου με σύστημα ανάκτησης απωλειών θερμότητας μπορεί να αυξήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα έως και 60% [31]. Το πρώτο πλοίο που χρησιμοποιεί αποκλειστικά τεχνολογία κυψελών καυσίμου κατασκευάστηκε το 2008 στη Νέα Ζηλανδία και οι κύριες μηχανές του χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, ισχύος  $48\text{kW}$  η κάθε μία. Πλέον χρησιμοποιούνται σε επιβατηγά πλοία για μικρές διαδρομές και κυρίως για πλεύση σε ποτάμια. Τα μειονεκτήματα, όμως, της χρήσης συστημάτων κυψελών καυσίμου είναι το αυξημένο κόστος σε συνδυασμό με

την ενεργειακή πυκνότητα, καθώς και ο μειωμένος χρόνος ζωής των αντίστοιχων συστημάτων, ο οποίος είναι αισθητά μικρότερος από αυτό των μηχανών εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 14: Το πρώτο πλοίο με κυψέλες καυσίμου [32]

Στον πίνακα 4 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα επιτυχημένα συστήματα κυψελών καυσίμου που έχουν κατασκευαστεί και χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 4: Επιτυχημένες κατασκευές τεχνολογίας κυψελών καυσίμου [17]

Τύπος κυψέλης καυσίμου	Όνομα πλοίου	Καύσιμο	Ισχύ
Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου	<i>Felicitas subproject 2</i>	<i>LNG</i>	<i>250kW</i>
	<i>METHAPU Undine</i>	Μεθανόλη	<i>20kW</i>
	<i>SchIBZMS Forester</i>	<i>Diesel</i>	<i>100kW</i>
Υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων	<i>RiverCell</i>	Μεθανόλη	<i>250kW</i>
	<i>Pa-x-el MS Mariela</i>	Μεθανόλη	<i>2 x 30kW</i>
	<i>RiverCell Elektra</i>	Υδρογόνο	<i>3 x 100kW</i>
	<i>MF Vagen</i>	Υδρογόνο	<i>12kW</i>
Κυψέλες καυσίμου τετηγμένου άνθρακα	<i>MC WAP</i>	<i>Diesel</i>	<i>150 / 500kW</i>
	<i>Felloship Viking Lady</i>	<i>LNG</i>	<i>320kW</i>
	<i>US SSFC</i>	<i>Diesel</i>	<i>625kW</i>
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου	<i>Hydra</i>	Υβρίδια μετάλλου	<i>6,9kW</i>
	<i>Hydrocell Oy</i>	Υβρίδια μετάλλου	<i>30kW</i>
Χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων	<i>Elding</i>	Υδρογόνο	<i>10kW</i>
	<i>Zemship Alterwasser</i>	Υδρογόνο	<i>96kW</i>
	<i>Hydrogenesis</i>	Υδρογόνο	<i>12kW</i>
	<i>SF-Breeze</i>	Υδρογόνο	<i>120kW</i>
	<i>Cobalt 233 Zet</i>	Υδρογόνο	<i>50kW</i>
	<i>US SSFC</i>	<i>Diesel</i>	<i>500kW</i>

## **2.2.4 Λοιπά τεχνολογικά μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας**

Τα τελευταία έτη αναπτύσσονται τεχνικές διαχείρισης ενέργειας ώστε να περιοριστούν οι ενεργειακές απώλειες. Αυτές οι τεχνικές είναι [17]:

- Θερμομόνωση
- Βελτιστοποίηση των χώρων αποθήκευσης
- Βελτιστοποίηση του συστήματος εξαερισμού του φορτίου

## **2.3 Λειτουργικά μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας**

Τα λειτουργικά μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τη σχεδίαση του ταξιδιού και την εκτέλεση του ταξιδιού [17].

### **2.3.1 Σχεδίαση ταξιδιού (*voyage planning*)**

Ειδικότερα, για τα δεξαμενόπλοια και φορτηγά πλοία ξηρού φορτίου ο προγραμματισμός του ταξιδιού αρχίζει κατά τις διαδικασίες ναύλωσης και οι αποφάσεις αυτές λαμβάνονται από τους διαχειριστές των ναυλώσεων των ναυτιλιακών εταιρειών. Ο γενικός στόχος κατά τον προγραμματισμό του ταξιδιού είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του κόστους ταξιδιού. Το κόστος των καυσίμων είναι από τα σημαντικότερα κόστη και συνδέεται άμεσα με τη ταχύτητα του πλοίου. Κατά τον σχεδιασμό του ταξιδιού τα ενδιαφερόμενα μέρη (ναυλωτές και πλοιοκτήτες) καθορίζουν τις λεπτομέρειες του ταξιδιού με απώτερο σκοπό την βέλτιστη ενεργειακή αποδοτικότητα. Οι προγραμματισμένες ταχύτητες του ταξιδιού που καθορίζονται κατά τον σχεδιασμό συνδέονται άμεσα με την ενεργειακή αποδοτικότητα [33]. Σύμφωνα με μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, το μέτρο της μείωσης της ταχύτητας εξετάζεται ως ένα

βασικό μέτρο που δύναται να επηρεάσει τον *EEDI*. Όμως αυτό το μέτρο δεν είναι πάντα εφικτό εξαιτίας των ρητρών μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών κατά τη ναύλωση που απαιτούν την αποστολή στον συντομότερο δυνατό χρόνο. Μελετώντας δεδομένα από το *AIS*<sup>8</sup>, οι *Adland* και *Jia* (2017) κατέληξαν στο συμπέρασμα πως τα φορτηγά πλοία ξηρού φορτίου κατηγορίας *capsize* τα έτη 2011 - 2012 δεν μείωσαν ταχύτητα παρά τις αυξημένες τιμές των καυσίμων και τα χαμηλά ναύλα. Ο λόγος ήταν οι ρήτρες ναύλωσης που απαιτούσαν υψηλές ταχύτητες εξυπηρέτησης. Οι *Adland* και *Jia* [34] πρότειναν στους ναυλωτές και τους πλοιοκτήτες τη σύναψη ρητρών όπου θα επιτρέπεται η μείωση της ταχύτητας, με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου στην περίπτωση συμφόρησης σε λιμένες. Αντιθέτως, οι ιδιοκτήτες φορτίου πετρελαίου είναι διστακτικοί στην εφαρμογή του μέτρου της μείωσης της ταχύτητας, καθώς η ταχύτερη διαμετακόμιση αποτελεί προτεραιότητα.

Στην περίπτωση της χρονοναύλωσης (*time charter freight*) για εμπορικά πλοία μεταφοράς χύδην φορτίο το μέτρο της μείωσης της ταχύτητας δεν βρίσκει εφαρμογή, καθώς η αξία του χρόνου υπερβαίνει την αξία της εξοικονόμησης καυσίμου, όμως, στην περίπτωση των *containers* η σχεδίαση και ο προγραμματισμός του ταξιδιού είναι απαραίτητα για την επίτευξη της βέλτιστης ενεργειακής αποδοτικότητας. Ο λόγος είναι πως κυριαρχεί η *liner* ναύλωση (τα εμπορικά πλοία ακολουθούν προκαθορισμένες εμπορικές διαδρομές) όπου η επιλογή της κατάλληλης διαδρομής και της ταχύτητας επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή αποδοτικότητα. Σύμφωνα με στοιχεία της μελέτης του *Cariou* και των συνεργατών του [35], η βελτίωση των δικτύων διαδρομών ώστε να είναι εφικτή η μείωση της ταχύτητας σε συνδυασμό με εφαρμογή νέων τεχνολογικών μέτρων για τη μείωση των εκπομπών είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση έως και 53% των εκπομπών *CO<sub>2</sub>* για τα έτη 2007 - 2016.

Ο προγραμματισμός του ταξιδιού δεν δύναται να εφαρμοστεί σε πλοία τακτικών γραμμών, όπως για παράδειγμα για τα *E/O*<sup>9</sup> στο Αιγαίο. Όμως, στις περιπτώσεις φορτηγών πλοίων και δεξαμενόπλοιων, ο κατάλληλος προγραμματισμός του ταξιδιού, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η εποχικότητα, η συμφόρηση σε λιμένες ή στις διώρυγες του Παναμά και του

---

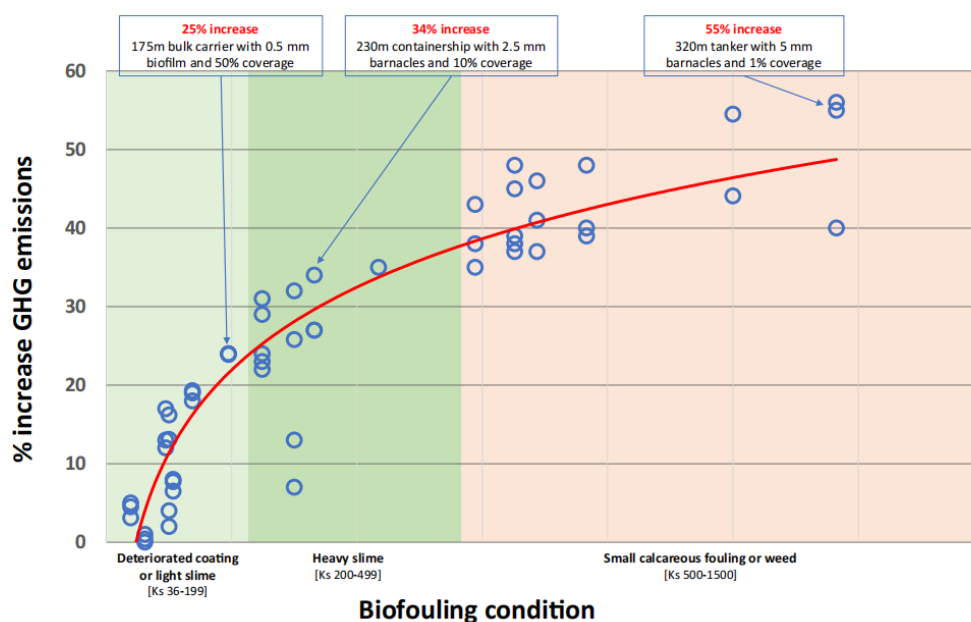
<sup>8</sup> *Automatic identification system*

<sup>9</sup> Επιβατηγό-οχηματαγωγό

Σουέζ, καθώς και το διεθνές εμπόριο, μπορούν να οδηγήσουν σε βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας.

### 2.3.2 Εκτέλεση ταξιδιού (*voyage execution*)

Οι διαδικασίες συντήρησης και επισκευών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, καθώς είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται σύμφωνα με οργανόγραμμα συντήρησης του πλοίου. Η συντήρηση και ο καθαρισμός της προπέλας και της γάστρας του πλοίου, λόγω συσσώρευσης βιολογικών ρύπων σε αυτά, αποτελεί μια άλλη σημαντική αιτία χαμηλής ενεργειακής αποδοτικότητας. Σύμφωνα με μελέτες του ιδρύματος *Global Environment Facility (GEF)*, οι επιπτώσεις στην αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου ανέρχεται σε ποσοστά μεταξύ 10 - 20%, όπου σε περίπτωση που δεν αντιμετωπιστεί το πρόβλημα τα συγκεκριμένα ποσοστά αυξάνονται σε σημαντικό βαθμό.



Εικόνα 15: Επίδραση της συσσώρευσης των βιολογικών ρύπων στη γάστρα του πλοίου στην αύξηση των εκπομπών ρύπων [36]

Σύμφωνα με την έκθεση του ιδρύματος *GEF* που πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με τον *IMO*, όταν το 50% της επιφάνειας της γάστρας καλύπτεται από ένα στρώμα βιολογικών ρύπων υπό την μορφή παχύρευστου υγρού, η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αντιστοιχεί σε 20 - 25%,



ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πλοίου. Η εφαρμογή νέων εξελιγμένων αντιρρυπαντικών επικαλύψεων της γάστρας σε συνδυασμό με την αποτελεσματική συντήρηση συμβάλλουν σημαντικά στην αντιμετώπιση του προβλήματος.

Για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την επίτευξη βελτιωμένων τιμών του *EEDI* μια σημαντική παράμετρος αποτελεί η εκπαίδευση του πληρώματος, ώστε κατά την εκτέλεση του ταξιδιού να αποφεύγονται τα σφάλματα που οδηγούν σε ενεργειακές απώλειες. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, πλέον, υπάρχουν λογισμικά και εφαρμογές που παρέχουν τα κατάλληλα δεδομένα σχετικά με τις καιρικές συνθήκες. Η σωστή και αποτελεσματική χρήση αυτών των δεδομένων από τους υπεύθυνους αξιωματικούς του πλοίου συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Ο *IMO* το 2016 στις κατευθυντήριες οδηγίες που εξέδωσε σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα συνέστησε στις ναυτιλιακές εταιρείες να αναβαθμίσουν τα συστήματα παρακολούθησης της απόδοσης του πλοίου και να διερευνήσουν τις βέλτιστες πρακτικές ενεργειακής απόδοσης για το εκάστοτε πλοίο τους. Η κατάλληλη εκπαίδευση του πληρώματος είναι αναγκαία για την εκτέλεση ενός ενεργειακά αποδοτικότερου ταξιδιού.

#### **2.4 Οδηγίες για την εφαρμογή του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας**

Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (*SEEMP*) είναι ένα σχέδιο διαχείρισης που έχει εφαρμογή τόσο στα νέα πλοία όσο και στα ήδη κατασκευασμένα, όπου μέσω επιχειρησιακών αλλαγών βελτιστοποιεί την κατανάλωση καυσίμου. Σύμφωνα με τις οδηγίες της επιτροπής *MEPC*, κάθε νέο πλοίο που κατασκευάζεται με χωρητικότητα άνω των 400 *gross tonnage* είναι υποχρεωμένο να έχει εγκατεστημένο το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (*SEEMP*), το οποίο αποτελείται από 4 στάδια [37]:

1. Στάδιο σχεδιασμού
2. Στάδιο εκτέλεσης
3. Στάδιο παρακολούθησης

#### 4. Στάδιο αυτό - αξιολόγησης και βελτίωσης

Το συγκεκριμένο σχέδιο υπόκειται σε συνεχή βελτίωση, καθώς η διαδικασία είναι κυκλική.

Στο **στάδιο σχεδιασμού** γίνεται η διερεύνηση της υπάρχουσας ενεργειακής κατάστασης του πλοίου. Προσδιορίζονται πλήρως οι πηγές ενέργειας του πλοίου καθώς και οι ενεργειακές απαιτήσεις. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο στάδιο γίνεται προσδιορισμός των τυχόν υφισταμένων μέτρων βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης που χρησιμοποιούνται. Το συγκεκριμένο στάδιο είναι ζωτικής σημασίας και αποτελεί το σημείο εκκίνησης κάθε εργασίας μετασκευής πλοίου. Κατά το συγκεκριμένο στάδιο γίνεται η ανάλυση και σχεδίαση των απαραίτητων εργασιών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Ειδικότερα, καθορίζονται τα απαραίτητα λειτουργικά και επιχειρησιακά μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, όπως η μείωση της ταχύτητας, η πλοήγηση με βάση τις καιρικές συνθήκες, οι απαραίτητες σχεδιαστικές βελτιώσεις, η αναβάθμιση των συστημάτων παρακολούθησης της απόδοσης κ.α. Επιπλέον, καθορίζονται ειδικά μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης από την ναυτιλιακή εταιρεία σε συνδυασμό με τα ενδιαφερόμενα μέρη με σημαντικότερο από αυτά το «*just in time arrival*» (*JIT*). Επιπλέον, στο συγκεκριμένο στάδιο γίνεται πλήρης ανάλυση και σχεδίαση των απαραίτητων προγραμμάτων εκπαίδευσης και ενημέρωσης του προσωπικού σχετικά με όλα τα θέματα που συνδέονται είτε άμεσα είτε έμμεσα με την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τέλος, καθορίζονται οι επιδιωκόμενοι στόχοι επίτευξης, καθώς και το χρονοδιάγραμμα έναρξης και ολοκλήρωσης των απαραίτητων εργασιών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

Το **στάδιο της εκτέλεσης** αποτελείται από δύο μέρη:

1. Καθιέρωση του συστήματος εφαρμογής, όπου γίνεται ο καθορισμός των διαδικασιών για τη διαχείριση ενέργειας και των καθηκόντων
2. Τήρηση αρχείου, όπου παράλληλα με την εκτέλεση του σχεδίου είναι αναγκαία και η τήρηση αρχείων, στην οποία καταγράφονται όλες οι διαδικασίες που υλοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα. Η τήρηση αρχείου είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση των μέτρων για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου.

Το **στάδιο της παρακολούθησης** αποτελείται από δύο μέρη, τα εργαλεία παρακολούθησης του σχεδίου και το σύστημα παρακολούθησης. Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης καθορίζονται στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού. Στο συγκεκριμένο στάδιο υλοποιείται η μέθοδος παρακολούθησης και η δημιουργία του συστήματος παρακολούθησης. Υλοποιούνται τα μέτρα που αποφασίστηκαν στο στάδιο σχεδιασμού, λαμβάνονται οι αποφάσεις σχετικά με τα δεδομένα που θα συλλέγονται καθώς και το υπεύθυνο προσωπικό που θα συλλέγουν αυτά τα δεδομένα. Για τα πλοία άνω των 5.000 *gross tonnage* σύμφωνα με τον κανονισμό 27 *MARPOL ANNEX VI* είναι υποχρεωτική η παρακολούθηση και καταγραφή των δεδομένων σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου. Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται το έντυπο καταγραφής της κατανάλωσης καυσίμου σύμφωνα με τον κανονισμό 27 *MARPOL ANNEX VI*.

Το τελικό **στάδιο της αξιολόγησης** είναι αναγκαίο για την βελτίωση του προγράμματος, καθώς μετά την ανατροφοδότηση των πληροφοριών αναβαθμίζεται το σχέδιο, ενώ ταυτόχρονα διορθώνονται οι όποιες αστοχίες ή παραλείψεις. Κατά το στάδιο της αξιολόγησης, καθιερώνονται οι απαραίτητες διαδικασίες αυτό-αξιολόγησης ανά στάδιο του σχεδίου. Επιπλέον, γίνεται αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων βελτίωσης της απόδοσης που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στα προηγούμενα δύο στάδια.

Date from (dd/mm/yyyy)	Date to* (dd/mm/yyyy)	Distance Travelled (n.m)	Hours Underway (hh:mm)	Fuel Consumption (Metric tons)						
				DO/GO	LFO	HFO	LPG(P)	LPG(B)	LNG	Others(C <sub>7</sub> )
01/01/2019		210	24:00	2	3	19	0	0	0	0
02/01/2019		283	24:00	2	0	20	0	0	0	0
03/01/2019		321	24:00	2	0	18	0	0	0	0
04/01/2019		221	24:00	1	0	19	0	0	0	0
05/01/2019		320	18:00	2	0	13	0	0	0	0
06/01/2019		302	24:00	2	0	17	0	0	0	0
07/01/2019		210	24:00	1	0	19	0	0	0	0
08/01/2019		302	24:00	1	0	20	0	0	0	0
09/01/2019		280	24:00	2	0	21	0	0	0	0
10/01/2019		50	01:00	3	0	2	0	0	0	0
11/01/2019		198	24:00	3	0	21	0	0	0	0
*		*	*	*	*	*	*	*	*	*
*		*	*	*	*	*	*	*	*	*
*		*	*	*	*	*	*	*	*	*
30/12/2019		320	24:00	0	0	20	0	0	0	0
31/12/2019		213	24:00	1	0	17	0	0	0	0
<b>Annual Total</b>										

Εικόνα 16: Έντυπο καταγραφής κατανάλωσης καυσίμου [37]

Το πρότυπο που παρουσιάζεται στην εικόνα 16 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασικό σύστημα παρακολούθησης για την κατανάλωση και την απόδοση καυσίμου. Σε πολλές περιπτώσεις, η πηγή των δεδομένων είναι οι καθημερινές μεσημεριανές αναφορές και θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε να διασφαλίζεται η συνέπεια, η επαναληψιμότητα και η ακρίβεια κατά την καταγραφή ημερομηνίας, ώρας, διανυθείσας απόστασης και κατανάλωσης καυσίμου. Τα δεδομένα υψηλότερης συχνότητας που καταγράφονται αυτόματα από διάφορους αισθητήρες μπορούν να παρέχουν μια πιο λεπτομερή κατανόηση σχετικά με την αποτελεσματικότητα του πλοίου, αλλά δεν είναι πάντα διαθέσιμα. Για την συλλογή και αξιολόγηση αυτών των δεδομένων απαιτείται ειδική μέριμνα και εκπαίδευση του κατάλληλου προσωπικού στα νέα τεχνολογικά συστήματα που χρησιμοποιούνται. Στην εικόνα 17 που ακολουθεί, παρουσιάζεται το πρότυπο καταγραφής των επιπρόσθετων δεδομένων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα.

Start Date and Time from (DD-MM-YY HH:MM) (UTC)	End Date and Time from (DD-MM-YY HH:MM) (UTC)	Hours Underway (h)	Distance Travelled (nm)	Average Speed (knots)	Mean draft (m)	Trim (m) aft is -ve	M/E Consumption (metric tonnes)			A/E Consumption (metric tonnes)			Observations (e.g. hull cleaned, propeller polished, ice voyage, bad weather encountered)
							MDO/MGO	HFO	Others	MDO/MGO	HFO	Others	
1-Jan-2020 2:00	1-Jan-2020 3:24	0.00	0.0							0.3			
1-Jan-2020 3:24	2-Jan-2020 9:12	29.80	342.7	11.5	8.2	-0.4		31.2		8.6			
2-Jan-2020 9:12	6-Jan-2020 15:00	101.80	997.6	9.8	8.1	-0.6		110.7		27.4			
6-Jan-2020 15:00	10-Jan-2020 7:00	0.00	0.0							23.2			
10-Jan-2020 7:00	15-Jan-2020 18:30	131.50	1341.3	10.2	7.9	0.1		151.2		31.2			
15-Jan-2020 18:30	17-Jan-2020 10:00	0.00	0.0							11.2			

Εικόνα 17: Έντυπο καταγραφής επιπρόσθετων δεδομένων [37]

Ο σκοπός της καταγραφής και αξιολόγησης των παραπάνω δεδομένων είναι να καταστεί δυνατή η σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ διαφορετικών ταξιδιών και η χρησιμοποίησή τους σε διάφορους λόγους όπως *AER* και *EEOI*.

Ο υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου γίνεται με τρεις μεθόδους [37]:

1. Με χρήση του *BDN* (*Bunker Delivery Note*)
2. Με χρήση του τακτικού ελέγχου των αποθεμάτων καυσίμου του πλοίου και υπολογισμός της κατανάλωσης για την εκάστοτε περίοδο αναφοράς
3. Με χρήση μετρητών ροής καυσίμου

## 2.5 Διαδικασία επαλήθευσης του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας

Η επαλήθευση του *SEEMP PART III* βοηθάει τις ίδιες της ναυτιλιακές εταιρείες στην επιτυχή επίτευξη του *CII* (*carbon indicator index*). Το έγγραφο *SEEMP PART III* υπόκειται σε συνεχείς ενημερώσεις και αναθεωρήσεις. Ως εκ τούτου, η διαδικασία ελέγχου και επαλήθευσής του είναι ιδιαίτερως σημαντική.

Η διαδικασία επαλήθευσης και ελέγχου για το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια [38]:

- Αρχικός έλεγχος και επαλήθευση
- Περιοδικοί έλεγχοι και επαληθεύσεις
- Πρόσθετες επαληθεύσεις
- Εταιρικοί έλεγχοι

Αρχικά, υποβάλλονται στον αρμόδιο νηογνώμονα τα δεδομένα από τα εργαλεία παρακολούθησης της απόδοσης του πλοίου και ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση με βάση τα αντίστοιχα στοιχεία προηγούμενων ετών. Η καταλυτική ημερομηνία κατάθεσης των απαραίτητων δεδομένων σύμφωνα με την οδηγία *MARPOL Annex VI* είναι 01/01/2023 για τα ήδη κατασκευασμένα πλοία. Ακολούθως, η αρμόδια ελεγκτική αρχή σε περίπτωση ικανοποιητικής αξιολόγησης εκδίδει το έντυπο της Επιβεβαίωσης Συμμόρφωσης, το οποίο παρατίθεται στην εικόνα 18 που ακολουθεί.

ANNEX

**SAMPLE FORMAT FOR CONFIRMATION OF COMPLIANCE**

**CONFIRMATION OF COMPLIANCE – SEEMP PART III**

Issued under the provisions of the Protocol of 1997, as amended, to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 related thereto (hereinafter referred to as "the Convention") under the authority of the Government of:

.....  
(full designation of the Country)

by .....

(full designation of the competent person or organization authorized under the provisions of the Convention)

Particulars of ship\*

Name of ship .....

Distinctive number or letters .....

IMO number† .....

Port of registry .....

Gross tonnage .....

SEEMP part III date of revision, as applicable .....

THIS IS TO CONFIRM:

Taking into account the *2022 Guidelines for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)* adopted by resolution MEPC.346(78), the ship's SEEMP has been developed and complies with regulation 26.3.1 of Annex VI of the Convention.

Issued at: .....

(place of issue of the Confirmation)

Date (dd/mm/yyyy) .....  
(date of issue)

.....  
(signature of duly authorized official  
issuing the Confirmation)

(seal or stamp of the authority, as appropriate)

\* Alternatively, the particulars of the ship may be placed horizontally in boxes.

† In accordance with the IMO Ship Identification Number Scheme, adopted by the Organization by resolution A.1117(30).

\*\*\*

Εικόνα 18: Έντυπο της Επιβεβαίωσης Συμμόρφωσης για το αρχικό στάδιο του ελέγχου [37]

Ακολουθεί έλεγχος επί του πλοίου για να διαπιστωθεί εάν είναι εγκατεστημένα τα κατάλληλα συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης της απόδοσης του πλοίου. Γίνεται έλεγχος της βαθμονόμησής τους, ενώ επιπλέον, γίνεται ο

έλεγχος του αρχείου συντήρησής τους. Στη συνέχεια, διενεργούνται περιοδικοί έλεγχοι σχετικά με τη σωστή τήρηση και καταγραφή των αρχείων, ενώ αξιολογείται το ανθρώπινο δυναμικό του πλοίου σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η ίδια η εταιρεία είναι υπεύθυνη για τη συντήρηση του απαραίτητου εξοπλισμού και την κατάρτιση του προσωπικού.

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω σταδίων επαλήθευσης εκδίδεται το Διεθνές Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης (*Issuance of International Energy Efficiency Certificate*).

Συνήθως, οι εταιρείες αναθέτουν την συνολική διαδικασία ελέγχου και επαλήθευσης του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας σε αναγνωρισμένες από τον *IMO* συμβουλευτικές εταιρείες, οι οποίες αναλαμβάνουν εξ' ολοκλήρου την διαδικασία έκδοσης του Διεθνές Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης. Μια τέτοια εταιρεία είναι η *DNV*, όπου κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του ακολουθούνται τα εξής [35]:

1. Ο υπολογισμός του *CII* σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά κάθε πλοίου.
2. Τον στόχο επίτευξης του *CII* για την επόμενη τριετία.
3. Ένα σχέδιο υλοποίησης που να τεκμηριώνει με σαφήνεια όλα τα απαραίτητα βήματα επίτευξης του απαιτούμενου στόχου σχετικά με το *CII* για τα επόμενα τρία χρόνια, με ετήσιους επιμέρους στόχους.
4. Τις διαδικασίες αυτό-αξιολόγησης και βελτίωσης.
5. Σχέδιο διορθωτικών ενεργειών σε περίπτωση που δεν επιτευχθούν οι εκάστοτε στόχοι.

Η διαδικασία ελέγχου και επαλήθευσης του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας περιλαμβάνει και τον υπολογισμό του δείκτη *EEDI* σε δύο στάδια: α) του σχεδιασμού και β) σε συνθήκες πλεύσης.

Σε αμφότερα τα στάδια, ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του *MARPOL ANNEX VI* και ακολουθεί η αντίστοιχη πιστοποίηση. Όλες οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται κατά τις διαδικασίες επαλήθευσης προστατεύονται από τη διεθνή νομοθεσία σχετικά με την πνευματική ιδιοκτησία.

Για τις ανάγκες της διαδικασίας υπολογισμού του δείκτη, η εκάστοτε ναυτιλιακή εταιρεία παρέχει στην υπεύθυνη εταιρεία ελέγχου τον *Τεχνικό Φάκελο (EEDI Technical File)*, ο οποίος περιέχει τα απαραίτητα δεδομένα για τον υπολογισμό του δείκτη, τα οποία στο ελάχιστο είναι τα ακόλουθα:

- *Deadweight (DWT)* ή *Gross Tonnage (GT)* (ανάλογα την κατηγορία του πλοίου)
- *MCR*
- $v_{ref}$
- Τύπο καυσίμου και ειδική κατανάλωση καυσίμου (*SFC*)
- *Electric Power Table* (ηλεκτρονικό πίνακα ισχύος του πλοίου)
- Καμπύλες ισχύος και ταχύτητας του πλοίου
- Τα κύρια στοιχεία του πλοίου και τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις ενεργειακές απαιτήσεις του πλοίου και το σύστημα πρόωσής του
- Περιγραφή του συστήματος εξοικονόμησης ενέργειας

Στην περίπτωση δεξαμενόπλοιων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι αναγκαίες και οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Τύπος και περιγραφή συστήματος πρόωσης
- Τύπος και χωρητικότητα δεξαμενών αποθήκευσης
- *BOR (boil-off rate)*
- *Shaft power of the propeller & shaft after transmission gear at 100% of the rated output of MPP motor*
- *MCT of steam turbine & SFC of steam turbine*

Στην εικόνα 19 που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα υπόδειγμα τεχνικού φακέλου, ενώ στην εικόνα 20 παρουσιάζεται το διάγραμμα των καμπύλων ισχύων - ταχύτητας.



## 1 Data

### 1.1 General information

Shipbuilder	JAPAN Shipbuilding Company
Hull no.	12345
IMO no.	94111XX
Ship type	Bulk carrier

### 1.2 Principal particulars

Length overall	250.0 m
Length between perpendiculars	240.0 m
Breadth, moulded	40.0 m
Depth, moulded	20.0 m
Summer load line draught, moulded	14.0 m
Deadweight at summer load line draught	150,000 tons

### 1.3 Main engine

Manufacturer	JAPAN Heavy Industries Ltd.
Type	6J70A
Maximum continuous rating (MCR)	15,000 kW x 80 rpm
SFC at 75% MCR	165.0 g/kWh
Number of sets	1
Fuel type	Diesel Oil

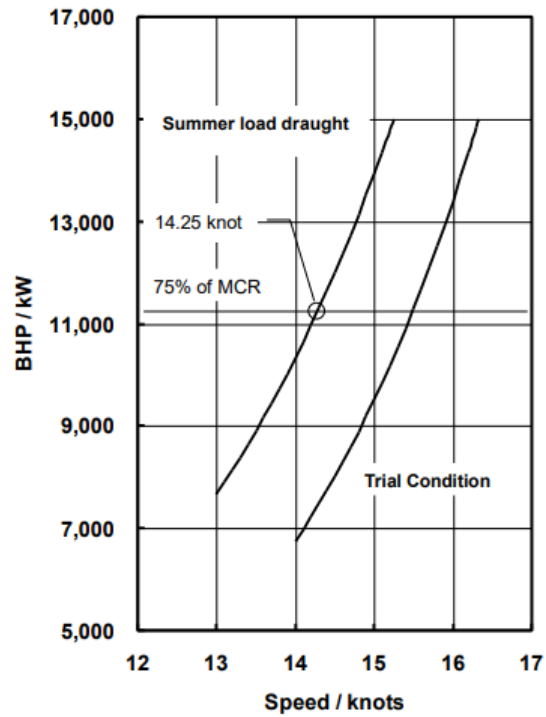
### 1.4 Auxiliary engine

Manufacturer	JAPAN Diesel Ltd.
Type	5J-200
Maximum continuous rating (MCR)	600 kW x 900 rpm
SFC at 50% MCR	220.0 g/kWh
Number of sets	3
Fuel type	Diesel Oil

### 1.5 Ship speed

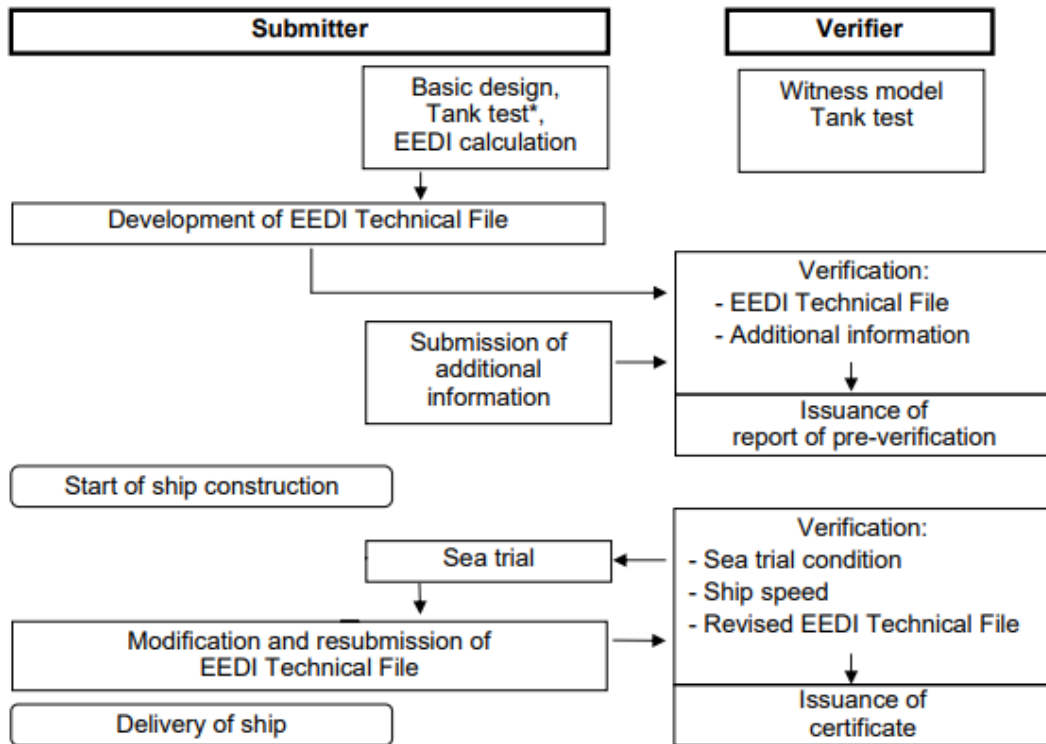
Ship speed in deep water at summer load line draught at 75% of MCR	14.25 knots
--	-------------

Εικόνα 19: Υπόδειγμα τεχνικού φακέλου [39]



Εικόνα 20: Καμπύλες ισχύος - ταχύτητας [40]

Τέλος, στην εικόνα 21 που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα της διαδικασίας ελέγχου και πιστοποίησης.



\* To be conducted by a test organization or a submitter.

Εικόνα 21: Διάγραμμα διαδικασίας επαλήθευσης και ελέγχου [40]

### Κεφάλαιο 3. Υπολογισμός του δείκτη *EEDI*

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση και ανάλυση τεσσάρων παραδειγμάτων υπολογισμού του δείκτη *EEDI* για διαφορετικές κατηγορίες πλοίων και συστήματος πρόωσης.

#### 3.1 Επιβατηγό με υβριδικό σύστημα πρόωσης (*diesel-electric*)

Αρχικά, γίνεται ο υπολογισμός του Δείκτη Σχεδιασμού Επιτευχθείσας Ενεργειακής Απόδοσης (*attained EEDI*). Ο υπολογισμός γίνεται αρχικά στη φάση του σχεδιασμού του πλοίου, σύμφωνα με τα ακόλουθα βήματα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα γίνεται μελέτη της αποδοτικότητας των βοηθητικών μηχανών.

##### Βήμα 1

- Υπολογισμός της ελάχιστης ισχύος πρόωσης (*Minimum Propulsive Power - MPP*), σύμφωνα με τα τεχνικά δεδομένα του πλοίου:

$$MPP = 2 \cdot 20.000kW$$

- Υπολογισμός του συντελεστή απόδοσης των κινητήρων πρόωσης του πλοίου, σύμφωνα με τα δεδομένα του ηλεκτρικού πίνακα ισχύος:

$$\eta_{PTi} = 0,945$$

- Υπολογισμός του μέσου συντελεστή απόδοσης των γεννητριών του πλοίου, σύμφωνα με τα δεδομένα του ηλεκτρικού πίνακα ισχύος:

$$\eta_{GEN} = \frac{0,975 \cdot 19.000 + 0,972 \cdot 14.000}{19.000 + 14.000} = 0,974$$

- Υπολογισμός του μέγιστου ηλεκτρικού φορτίου για ταξίδια σε καλοκαιρινές συνθήκες όπου επικρατούν θερμοκρασίες 28°C, αποκλείοντας τις ανάγκες για πρόωση:

$$HLOAD_{MAX} = 15.779kW$$

- Υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου των βοηθητικών μηχανών:

$$SFC_{AE} = 185g/kWh$$

όπου, ο υπολογισμός του έγινε σύμφωνα με τα στοιχεία του τεχνικού φακέλου NOx και αντιστοιχεί στο 75% της εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος ( $MCR^{10}$ ).

- $Gross\ Tonnage=160.000tn$

## Βήμα 2

- Υπολογισμός της συνολικής παρεχόμενης ισχύος στον άξονα κίνησης από τους βοηθητικούς κινητήρες  $\sum P_{PTi}$ , σύμφωνα με την εξίσωση (10)

$$\sum P_{PTi} = \frac{\sum(0,75 \cdot MPP_i)}{\eta_{PTi} \cdot \eta_{GEN}} \quad (10)$$

Όπου:

$$\sum P_{PTi} = \frac{2 \cdot 0,75 \cdot 20.000}{0,945 \cdot 0,974} = 32.593kW$$

όπου,  $\eta_{PTi}$  ορίζεται ο συντελεστής απόδοσης της αλυσίδας του μετασχηματιστή, του μετατροπέα συχνοτήτων και του ηλεκτρικού κινητήρα, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή και αντιστοιχεί στο 75% της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα.

## Βήμα 3

- Υπολογισμός της ισχύος των βοηθητικών μηχανών  $P_{AE}$

Η τιμή της μεταβλητής  $P_{AE}$  υπολογίζεται από τη συνολική ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται στο πλοίο, εξαιρουμένης των απαιτήσεων πρόωσης, στις πλέον απαιτητικές συνθήκες κρουαζιέρας (δηλαδή σε καταστάσεις όπου η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μέγιστη), διαιρούμενη με το συντελεστή απόδοσης των γεννητριών (οι τιμές δίνονται από τον κατασκευαστή):

<sup>10</sup> *Maximum continuous rating of main and auxiliary engines*

$$P_{AE} = \frac{HLOAD_{MAX}}{\eta_{GEN}} \quad (11)$$

Όπου:

$$P_{AE} = \frac{15.779kW}{0,974} = 16.200kW$$

#### Βήμα 4

- Υπολογισμός της ταχύτητας αναφοράς  $v_{ref}$

Η  $v_{ref}$  υπολογίζεται από τις καμπύλες ταχύτητας - ισχύος κατά τις δοκιμές του μοντέλου από το στάδιο του σχεδιασμού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει:

$$v_{ref} = 22,5kn$$

#### Βήμα 5

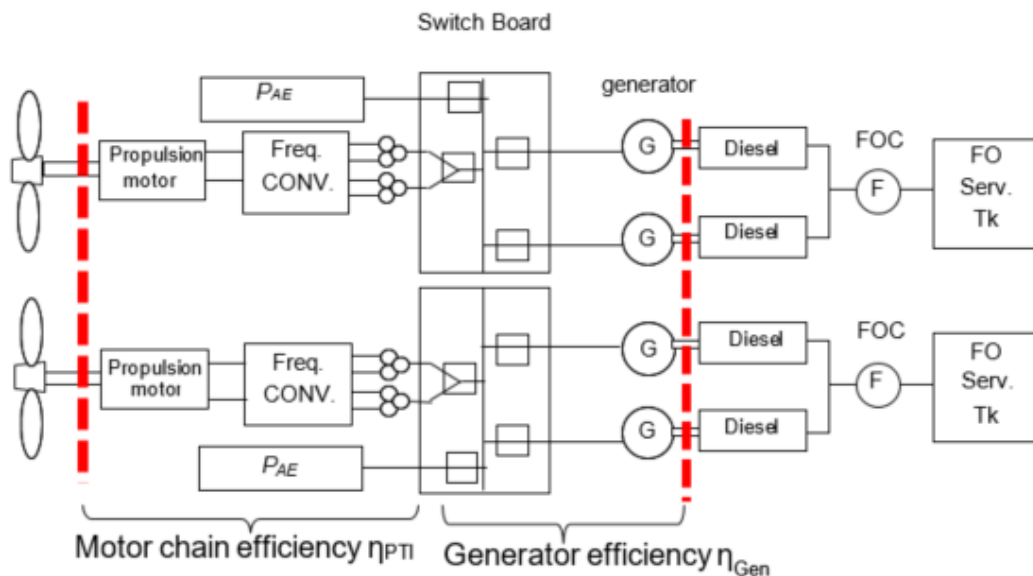
- Υπολογισμός του  $EEDI$

$$EEDI = \frac{(P_{AE} + \sum P_{PTi}) \cdot (Cf_{AE} \cdot SFC_{AE})}{capacity \cdot v_{ref}}$$

$$EEDI = \frac{(16.200 + 32.593) \cdot (3,206 \cdot 185)}{160000 \cdot 22,5} = 8,04$$

Με την ολοκλήρωση του υπολογισμού, στο πλαίσιο της σχεδίασης του πλοίου, ακολουθεί ο υπολογισμός σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης, όπου η μόνη διαφορά αφορά την ταχύτητα αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί σε  $22.7kn$  [39], με αποτέλεσμα την μείωση της τιμής του  $EEDI$  από 8,04 σε 7,97.

Στην εικόνα 22 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η τυπική διαμόρφωση του σχέδιο του ηλεκτρικού πίνακα του πλοίου, καθώς και τα σημεία μετρήσεων.



Εικόνα 22: Τυπική διαμόρφωση του ηλεκτρικού πίνακα του πλοίου δοκιμής [40]

### 3.2 Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με υβριδικό σύστημα πρόωσης (*diesel-electric propulsion system*)

Για τον υπολογισμό του δείκτη *EEDI* χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα δεδομένα, τα οποία λαμβάνονται από τον κατασκευαστή.

#### Βήμα 1

- Υπολογισμός εγκατεστημένης ισχύος πρόωσης κύριων μηχανών ( $MCR_{ME}$ )

$$MCR_{ME} = 3 \cdot 10.000kW + 1 \cdot 6.400kW = 36.400kW$$

- Υπολογισμός της ελάχιστης ισχύος πρόωσης (*Minimum Propulsive Power - MPP*), σύμφωνα με τα τεχνικά δεδομένα του πλοίου,

$$MPP = 24.000kW$$

- Υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου των κύριων ηλεκτρικών μηχανών

$$SFC_{ME} = 162g/kWh,$$

για τις μηχανές ισχύος των 10.000kW και

$$SFC_{ME} = 162,6g/kWh$$

για την μηχανή ισχύος 6.400kW, όπου ο υπολογισμός του έγινε σύμφωνα με τα στοιχεία του τεχνικού φακέλου NOx και αντιστοιχεί στο 75% της εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος (MCR).

Επιπλέον,

$$SFC_{ME,pilotfuel} = 6g/kWh$$

για τις μηχανές ισχύος των 10.000kW και

$$SFC_{ME,pilotfuel} = 6,1g/kWh$$

για τη μηχανή ισχύος των 6.400kW

- *Deadweight*= 75.000tn
- Υπολογισμός του συντελεστή ηλεκτρικής απόδοσης, σύμφωνα με τις οδηγίες του IMO για τα νέα πλοία:

$$\eta_{electrical} = 0,913 [40]$$

## Βήμα 2

- Υπολογισμός της ισχύος των κύριων μηχανών  $P_{ME}$ , ο οποίος γίνεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$P_{ME} = 0,83 \cdot \frac{MPP_{motor}}{\eta_{electrical}} \quad (12)$$

όπου:

$$P_{ME} = 0,83 \cdot \frac{24.000}{0,913} = 21.818kW$$

## Βήμα 3

- Υπολογισμός της ισχύος των βοηθητικών μηχανών  $P_{AE}$

Η τιμή της μεταβλητής  $P_{AE}$  δίνεται με βάση τον τύπο:

$$P_{AE} = 0,025 \cdot \sum_1^{nME} MCR_{ME} + 250 + 0,02 \cdot \sum_1^{nME} P_{ME} \quad (13)$$

όπου:

$$P_{AE} = 0,025 \cdot 24.000 + 250 + 0,02 \cdot 21,818 = 1.286 kW$$



#### Βήμα 4

- Υπολογισμός της ταχύτητας αναφοράς  $v_{ref}$

Η  $v_{ref}$  υπολογίζεται από τις καμπύλες ταχύτητας - ισχύος κατά τις δοκιμές του μοντέλου από το στάδιο του σχεδιασμού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει:

$$v_{ref} = 18,4kn,$$

η οποία αντιστοιχεί στο 83% της  $MPP_{motor}$ .

#### Βήμα 5

- Υπολογισμός του  $EEDI$

$$EEDI = \frac{P_{ME} \cdot (Cf_{ME\_gas} \cdot SFC_{ME\_gas} + Cf_{ME\_pilotfuel} \cdot SFC_{ME\_pilotfuel}) + P_{AE} \cdot (Cf_{AE\_gas} \cdot SFC_{AE\_gas} + Cf_{AE\_pilotfuel} \cdot SFC_{AE\_pilotfuel})}{capacity \cdot v_{ref}}$$

όπου:

$$EEDI = \frac{21.818 \cdot (2,75 \cdot 162,1 + 3,206 \cdot 6) + 1.286 \cdot (2,75 \cdot 162,1 + 3,206 \cdot 6)}{75.000(dwt) \cdot 18,4(kn)}$$
$$EEDI = 7,79$$

Η μέση ειδική κατανάλωση υπολογίστηκε σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$SFC = \frac{3 \cdot 162 \cdot 10.000 + 6,1 \cdot 6.400}{3 \cdot 10.000 + 6.400} = 6g/kWh$$

Με την ολοκλήρωση του υπολογισμού στο πλαίσιο της σχεδίασης του πλοίου, ακολουθεί ο υπολογισμός σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης.

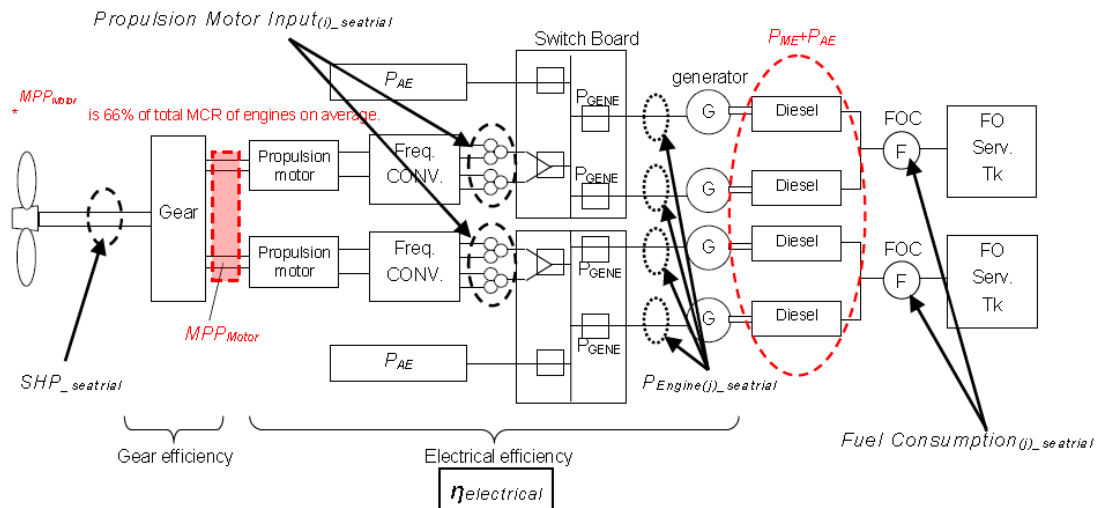
Οι διαφορές αφορούν:

- a) την ταχύτητα αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί σε 18,5kn,
- b) το νεκρό βάρος, όπου  $Deadweight=75.500dwt$ ,

c)  $SFC_{ME} = 161,7g/kWh$  με αποτέλεσμα την μείωση της τιμής του  $EEDI$  από 7,79 σε 7,67.

Η μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου οφείλεται στις διαφορετικές τιμές που λήφθηκαν κατά τους τεχνικούς ελέγχους.

Στην εικόνα 23 που ακολουθεί, παρουσιάζεται η τυπική διαμόρφωση του σχέδιο του ηλεκτρικού πίνακα του πλοίου, καθώς και τα σημεία μετρήσεων.



Εικόνα 23: Τυπική διαμόρφωση του ηλεκτρικού πίνακα του πλοίου δοκιμής [40]

### 3.3 Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα εκ νέου υγροποίησης (*re-liquefaction system*)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, επιλέγεται ένα σύγχρονο δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, το οποίο, όμως, έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από αυτό του παραδείγματος 3.2.

Για τον υπολογισμό του δείκτη  $EEDI$  χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα δεδομένα, τα οποία λαμβάνονται από τον κατασκευαστή.

#### Βήμα 1

- Υπολογισμός εγκατεστημένης ισχύος πρόωσης κύριων μηχανών ( $MCR_{ME}$ ):

$$MCR_{ME} = 2 \cdot 18.660kW = 37.320kW$$

- Υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου των κύριων και βοηθητικών μηχανών, όπου για τις κύριες μηχανές αντιστοιχεί στο 75% της  $MCR$  και για τις βοηθητικές στο 50%

$$\text{➤ } SFC_{ME} = 165g/kWh$$

$$\text{➤ } SFC_{AE} = 198g/kWh$$

Καθώς χρησιμοποιείται το σύστημα της εκ νέου υγροποίησης του φυσικού αερίου, πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής απόδοσης ισχύος σχεδιασμού για την υγροποίηση των αερίων βρασμού ανά μονάδα όγκου, ο οποίος δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$COP_{reliquefy} = \frac{d[kg/m^3] \cdot h[kj/k]}{24[h] \cdot 3.600[s] \cdot COP_{cooling}} \quad (15)$$

όπου,  $d$  η πυκνότητα του αερίου στους 110K και  $h$  η ενθαλπία εξάτμισης, ενώ:

$$COP_{cooling} = 0,166 \cdot R$$

όπου  $R=1$ , καθώς το σύνολο των αερίων  $BOG$  (*boil off gas*) επαναυγροποιούνται.

Άρα:

$$COP_{reliquefy} = \frac{425[kg/m^3] \cdot 511[kj/k]}{24[h] \cdot 3.600[s] \cdot 0,166} = 15,142$$

- $BOR=0,15\%$  ανά ημέρα (η ποσότητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου που εξατμίζεται ημερησίως εξαιτίας διαρροών θερμότητας)
- Χωρητικότητα δεξαμενών,

$$CargoTankCapacity = 211.900m^3$$

- $Deadweight= 109.000tn$

## Βήμα 2

- Υπολογισμός της ισχύος των κύριων μηχανών  $P_{ME}$ , ο οποίος αντιστοιχεί στο 75% της εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος

$$P_{ME} = 0,75 \cdot 37.320 = 27.990kW$$

### Βήμα 3

- Υπολογισμός της ισχύος των βοηθητικών μηχανών  $P_{AE}$

Η τιμή της μεταβλητής  $P_{AE}$  δίνεται με βάση τον τύπο:

$$P_{AE} = 0,025 \cdot MCR_{ME} + 250 + \text{CargoTankCapacity} \cdot \text{BOR} \cdot COP_{relieffy} \cdot R \quad (16)$$

όπου,

$$P_{AE} = 5.996kW$$

### Βήμα 4

- Υπολογισμός της ταχύτητας αναφοράς  $v_{ref}$

Η  $v_{ref}$  υπολογίζεται από τις καμπύλες ταχύτητας - ισχύος κατά τις δοκιμές του μοντέλου από το στάδιο του σχεδιασμού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει

$$v_{ref} = 19,7kn,$$

η οποία αντιστοιχεί στο 75% της  $MCR_{ME}$ .

### Βήμα 5

- Υπολογισμός του  $EEDI$  σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$EEDI = \frac{P_{ME} \cdot (Cf_{ME} \cdot SFC_{ME}) + P_{AE} \cdot (Cf_{AE} \cdot SFC_{AE})}{\text{capacity} \cdot v_{ref}} \quad (17)$$

όπου:

$$EEDI = \frac{27.990 \cdot (3,206 \cdot 165) + 5.996 \cdot (3,206 \cdot 198)}{109.000 \cdot 19,7} = 8,668$$

Με την ολοκλήρωση του υπολογισμού στο πλαίσιο της σχεδίασης του πλοίου, ακολουθεί ο υπολογισμός σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης.

Οι διαφορές αφορούν:

- a) την ταχύτητα αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί σε  $19,8kn$ ,
- b) το νεκρό βάρος, όπου  $Deadweight = 109.255dwt$ ,
- c)  $SFC_{ME} = 165,5g/kWh$  και  $SFC_{AE} = 198,5g/kWh$ , με αποτέλεσμα την μείωση της τιμής του  $EEDI$  από  $8,668$  σε  $8,629$

### 3.4 Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα πρόωσης τουρμπίνας ατμοστρόβιλου

Για τον υπολογισμό του δείκτη  $EEDI$  χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα δεδομένα, τα οποία λαμβάνονται από τον κατασκευαστή.

#### Βήμα 1

- Υπολογισμός εγκατεστημένης ισχύος πρόωσης των κύριων μηχανών ( $MCR_{steam\_turbine}$ )

$$MCR_{steam\_turbine} = 25.000kW$$

- Υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

$$SFC_{steam\_turbine} = 241g/kWh$$

- $Deadweight = 75.000tn$

#### Βήμα 2

Υπολογισμός της ισχύος των κύριων μηχανών  $P_{ME}$ , ο οποίος γίνεται με βάση τον τύπο:

$$P_{ME} = 0,83 \cdot MCR_{steam\_turbine} \quad (18)$$

όπου:

$$P_{ME} = 0,83 \cdot 25.000 = 20.750kW$$

Όσον αφορά την ισχύ των βοηθητικών μηχανών, στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται μηδενική, καθώς, σύμφωνα με τις οδηγίες του *IMO* κατά

τον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου περιλαμβάνεται η ισχύς των ηλεκτρικών γεννητριών.

### Βήμα 3

- Υπολογισμός της ταχύτητας αναφοράς  $v_{ref}$

Η  $v_{ref}$  υπολογίζεται από τις καμπύλες ταχύτητας - ισχύος κατά τις δοκιμές του μοντέλου από το στάδιο του σχεδιασμού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα ισχύει:

$$v_{ref} = 18,7kn,$$

η οποία αντιστοιχεί στο 83% της  $MCR_{steam\_turbine}$ .

### Βήμα 4

- Υπολογισμός του  $EEDI$

$$EEDI = \frac{P_{ME} \cdot (Cf_{ME} \cdot SFC_{ME}) + P_{AE} \cdot (Cf_{AE} \cdot SFC_{AE})}{capacity \cdot v_{ref}} \quad (19)$$

όπου:

$$EEDI = \frac{20.750 \cdot (2,75 \cdot 241)}{75.000 \cdot 18,7} = 9,81$$

Για τον υπολογισμό της τιμής του δείκτη σε συνθήκες πλεύσης, αρχικά, υπολογίζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου, η οποία είναι 240.7g/kWh, η ταχύτητα αναφοράς είναι 18,8kn και η τιμή του δείκτη  $EEDI$  μειώνεται από 9,81 σε 9.74.

## **3.5 Εμπορικό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου, κατηγορίας ice class**

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα υπολογίζεται ο δείκτης  $EEDI$  για *bulk carrier*, του οποίου τα δεδομένα παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.5 και χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τιμές.

## Βήμα 1

- Υπολογισμός εγκατεστημένης ισχύς προώσεως κύριων μηχανών ( $MCR_{ME}$ )

$$MCR_{ME} = 15.000kW$$

- Υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

$$SFC_{ME} = 165g/kWh$$

- $Deadweight= 150.000tn$

## Βήμα 2

- Υπολογισμός της ισχύος των κύριων μηχανών  $P_{ME}$ , ο οποίος γίνεται με βάση τον τύπο:

$$P_{ME} = 0,75 \cdot MCR_{ME}$$

όπου:

$$P_{ME} = 0,75 \cdot 15.000 = 11.250kW$$

## Βήμα 3

- Υπολογισμός της ισχύος των βοηθητικών μηχανών  $P_{AE}$

Η τιμή της μεταβλητής  $P_{AE}$  δίνεται με βάση των δεδομένων του τεχνικού φακέλου, όπου:

$$MCR_{AE} = 3 \cdot 600 = 1800kW$$

και

$$P_{AE} = 625kW$$

## Βήμα 4

- Υπολογισμός ειδικής κατανάλωσης καυσίμου για τις κύριες και βοηθητικές μηχανές.

$$\triangleright SFC_{ME} = 165g/kWh$$

$$\triangleright SFC_{AE} = 220g/kWh$$

## Βήμα 5

- Υπολογισμός του  $EEDI$

$$EEDI = \frac{P_{ME} \cdot (Cf_{ME} \cdot SFC_{ME}) + P_{AE} \cdot (Cf_{AE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot capacity \cdot v_{ref}} \quad (20)$$

όπου:

$$EEDI = \frac{11.250 \cdot 3.206 \cdot 165 + 625 \cdot 3.206 \cdot 220}{1 \cdot 150.000 \cdot 14,25} = 2,99$$

Ο αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης  $f_j$  είναι ίσος με τη μονάδα, όμως, λόγω των ειδικών καιρικών συνθηκών γίνεται εκ νέου υπολογισμός με χρήση του συντελεστή καιρού  $f_w = 0,9$ .

Οπότε:

$$EEDI = \frac{11.250 \cdot 3.206 \cdot 165 + 625 \cdot 3.206 \cdot 220}{0,9 \cdot 150.000 \cdot 14,25} = 3,32$$

### 3.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Αρχικά, θα γίνει ο υπολογισμός του *The reference EEDI*  $= a \cdot b^{-c}$  σύμφωνα με τη σχέση (2) για κάθε ένα από τα παραπάνω πλοία.

- 1) Για το επιβατηγό πλοίο της ενότητας 3.1 ισχύουν τα ακόλουθα:

$$The\ reference\ EEDI = 170,84 \cdot 160.000^{-0,214} = 13,15$$

Όποτε, η τιμή του απαιτούμενου δείκτη  $EEDI$  δίνεται από τη σχέση (3):

Ο συντελεστής μείωσης  $X$  δίνεται από τον πίνακα 2 και στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί σε 20 για τη φάση 2, οπότε έχουμε:



$$\text{Required EEDI} = \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot 13,15 = 10,52$$

Ισχύει:

$$\text{Attained EEDI} = 8,04 < 10,52$$

Η συγκεκριμένη τιμή αντιστοιχεί στο 76,4% της ανώτατης θεωρητικής τιμής και θεωρείται πολύ καλή τιμή καθώς είναι χαμηλότερη και από την απαιτούμενη τιμή της επόμενης φάσης εφαρμογής του δείκτη *EEDI*.

Η αντίστοιχη τιμή κατά τη δοκιμή σε συνθήκες πλεύσης είναι 7,97.

2) Για το δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με υβριδικό σύστημα πρόωσης της ενότητας 3.2 ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\text{The reference EEDI} = 2.253,7 \cdot 75.000^{-0,474} = 11,02$$

Επομένως, η τιμή του απαιτούμενου δείκτη *EEDI* δίνεται από τη σχέση (3):

Ο συντελεστής μείωσης *X* δίνεται από τον πίνακα 2 και στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί σε 20 για τη φάση 2, οπότε έχουμε:

$$\text{Required EEDI} = \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot 11,02 = 8,81$$

Ισχύει:

$$\text{Attained EEDI} = 7,79 < 8,81$$

Η συγκεκριμένη τιμή αντιστοιχεί στο 88,4% της ελάχιστης απαιτούμενης τιμής, γεγονός που καθιστά το πλοίο ενεργειακά αποδοτικό, ενώ οι τιμές του δείκτη *EEDI* κατά τις δοκιμές σε συνθήκες πλεύσης ικανοποιούν και τις απαιτήσεις της φάσης 3 (7,67 < 7,714).

3) Για το δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα εκ νέου υγροποίησης της ενότητας 3.3 ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\text{The reference EEDI} = 2.253,7 \cdot 109.000^{-0,474} = 9,23$$

Επομένως, η τιμή του απαιτούμενου δείκτη *EEDI* δίνεται από τη σχέση (3).

Ο συντελεστής μείωσης  $X$  δίνεται από τον πίνακα 2 και στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί σε 20 για τη φάση 2, οπότε έχουμε:

$$\text{Required EEDI} = \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot 9,23 = 7,38$$

Ισχύει:

$$\text{Attained EEDI} = 8,668 > 7,38$$

Η συγκεκριμένη τιμή υπερβαίνει την απαιτούμενη τιμή, ενώ προσεγγίζει την τιμή αναφοράς του δείκτη. Ενώ η τιμή του δείκτη σε συνθήκες πλεύσης είναι 8,629, είναι σαφές πως πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε να μειωθεί κάτω από το συγκεκριμένο όριο η τιμή του δείκτη.

4) Για το δεξαμενόπλοιο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα τουρμπίνας αμοστρόβιλου της ενότητας 3.4 ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\text{The reference EEDI} = 2.253,7 \cdot 75.000^{-0,474} = 11,02$$

Επομένως, η τιμή του απαιτούμενου δείκτη *EEDI* δίνεται από τη σχέση (3).

Ο συντελεστής μείωσης  $X$  δίνεται από τον πίνακα 2 και στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί σε 20 για τη φάση 2, οπότε έχουμε:

$$\text{Required EEDI} = \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot 11,02 = 8,816$$

Ισχύει:

$$\text{Attained EEDI} = 9,81 > 8,816$$

Η συγκεκριμένη τιμή υπερβαίνει την απαιτούμενη τιμή, ενώ προσεγγίζει την τιμή αναφοράς του δείκτη. Ενώ η τιμή του δείκτη σε συνθήκες πλεύσης είναι 9,74, είναι σαφές πως πρέπει να ληφθούν μέτρα ώστε να μειωθεί κάτω από το συγκεκριμένο όριο η τιμή του δείκτη.

5) Για το *bulk carrier* της ενότητας 3.5 ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\text{The reference EEDI} = 961,79 \cdot 150.000^{-0,477} = 3,265$$

Επομένως, η τιμή του απαιτούμενου δείκτη *EEDI* δίνεται από σχέση (3).

Ο συντελεστής μείωσης *X* δίνεται από τον πίνακα 2 και στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί σε 20 για τη φάση 2, οπότε έχουμε:

$$\text{Required EEDI} = \left(1 - \frac{20}{100}\right) \cdot 3,265 = 2,613$$

Η απαιτούμενη τιμή του δείκτη *EEDI* είναι χαμηλότερη και από τις δύο υπολογισθείσες τιμές του δείκτη (είτε λαμβάνοντας υπόψη τις καιρικές συνθήκες είτε όχι). Επομένως, κρίνεται αναγκαία η λήψη τεχνολογικών και λειτουργικών μέτρων για την μείωση του δείκτη.

Τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5: Τιμές του δείκτη *EEDI*

<b>Τύπος πλοίου</b>	<b><i>Attained EEDI</i></b>	<b><i>Required EEDI</i></b>
<i>Cruise passenger</i> ( <i>GT=160.000tn</i> )	8,04	10,52
<i>LNG carrier with diesel electric propulsion</i> ( <i>DWT=75.000tn</i> )	7,79	8,81
<i>LNG carrier diesel re-liquification system</i> ( <i>DWT=109.000tn</i> )	8,668	7,38
<i>LNG carrier steam turbine</i> ( <i>DWT=75.000tn</i> )	9,81	8,816
<i>Bulk carrier ice class</i> ( <i>DWT=150.000</i> )	2,99	2,613

Αρχικά, οι τιμές του *attained EEDI* σε συνθήκες πλεύσης είναι μικρότερες από αυτές που υπολογίστηκαν στο σχεδιαστικό σκέλος. Αυτό συμβαίνει διότι δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στην κατανάλωση καυσίμου και στην απαιτούμενη ισχύ, παρά μόνο στην ταχύτητα του πλοίου. Οι συγκεκριμένες δοκιμές σε συνθήκες πλεύσης πραγματοποιούνται σε ελεγχόμενες συνθήκες σε δεξαμενές.

## Κεφάλαιο 4. Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

### 4.1 Γενικά συμπεράσματα

Καθώς βρισκόμαστε στη φάση 2 των μέτρων περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αναλύοντας τα δεδομένα από το κεφάλαιο 3 καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- 1) Η βελτίωση των τιμών του δείκτη *EEDI* επιτυγχάνεται κυρίως με τη χρήση υβριδικού συστήματος πρόωσης (ηλεκτροπρόωση και ντίζελ).
- 2) Η χωρητικότητα του πλοίου αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες της τιμής του δείκτη, ειδικά όταν το  $dwt > 150.000tn$ .
- 3) Όσον αφορά την κατηγορία των *bulk carriers*, η τιμή του *required EEDI* είναι σαφώς χαμηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες και ο λόγος είναι οι συντελεστές υπολογισμού του *reference EEDI* που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 3.
- 4) Όπως είναι αναμενόμενο, η ισχύς των κύριων και βοηθητικών μηχανών είναι από τους κύριους παράγοντες της τιμής του δείκτη. Το ζητούμενο είναι η επίτευξη του ιδανικού συνδυασμού ισχύος - κατανάλωσης καυσίμου – χωρητικότητας – ταχύτητας.

Στην περίπτωση μετασκευής ήδη κατασκευασμένου πλοίου και δη των προηγούμενων δύο δεκαετιών, τα τεχνολογικά μέτρα που εξετάζονται με σκοπό την βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας είναι:

- Μετατροπή των κύριων μηχανών με σκοπό την χρήση εναλλακτικών καυσίμων, όπως *LNG*, *LPG*, αμμωνίας και αιθανόλης.
- Μετατροπή σε υβριδικό σύστημα πρόωσης ώστε να χρησιμοποιηθούν και ηλεκτρομηχανές, κυρίως για τα βοηθητικά συστήματα.
- Ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης απωλειών θερμότητας.
- Εφαρμογή συστημάτων μείωσης των αντιστάσεων της γάστρας, καθώς και η απαραίτητη συντήρηση και καθαρισμός.
- Λειτουργικά μέτρα, όπως η μείωση της ταχύτητας ώστε να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου.
- Εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης απόδοσης καθώς και εκπαίδευση του προσωπικού.

- Πλοήγηση σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες, καθώς και γενικότερη αναδιάρθρωση των διαδρομών μεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον παραμέτρους, όπως η συμφόρηση, η εποχικότητα και τα γενικά στοιχεία των αγορών.

Στον πίνακα που ακολουθεί, συνοψίζονται τα ποσοστά μείωσης των εκπομπών για το εμπορικό πλοίο *M/V Leyla Kalkan*, κατασκευής 1997, μήκος 149m και *dwt* 12.205tn, σύμφωνα με την αντίστοιχη μελέτη του *Aydin Tokuslu*.

Πίνακας 6: Μέτρα μείωσης των εκπομπών ρύπων και αντίστοιχο ποσοστό μείωσης [18]

Χρήση εναλλακτικών καυσίμων	3-4%
Μείωση ταχύτητας	10-15%
Μείωση αντιστάσεων γάστρας	4-5%
Σύστημα διαχείρισης θερμότητας	15-20%
Λειτουργικά μέτρα που σχετίζονται με την πλοήγηση	4-6%

Η επίτευξη των χαμηλότερων τιμών του δείκτη *EEDI* ενός ήδη κατασκευασμένου πλοίου επιτυγχάνεται με συνδυασμό των ανωτέρω μέτρων. Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη πως σε αρκετές περιπτώσεις, το κόστος μετασκευής είναι ιδιαίτερα υψηλό. Η μείωση της ταχύτητας, ουσιαστικά, αποτελεί μονόδρομο για τη βελτίωση των τιμών του δείκτη για παλαιότερα πλοία. Η μείωση από 15 κόμβους σε 12 έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ισχύς των κύριων μηχανών του πλοίου της μελέτης από 9.083kW σε 6.055kW, μείωση της τάξης του 33,3% ενώ η ταχύτητα μειώνεται κατά 20%. Στον πίνακα 7 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές της ισχύος των κύριων μηχανών για διάφορες τιμές της ταχύτητας.

Πίνακας 7: Ισχύς κύριων μηχανών σε σχέση με την ταχύτητα [18]

Ισχύς κύριων μηχανών (kW)	Ταχύτητα (kn)
10.092	16
9.083	15
8.074	14
7.064	13
6.055	12
5.046	11

#### 4.2 Μελλοντικά μέτρα

Σύμφωνα με τις οδηγίες του παραρτήματος της *MARPOL*, νέο πλοίο είναι κάθε πλοίο που ναυπηγήθηκε από το 2013 και μετά. Επομένως, από το 2023 και μετά, εκτός του δείκτη *EEDI*, ο οποίος είναι υποχρεωτικός για όλα τα νέα πλοία, θα είναι υποχρεωτικός και ο δείκτης *EEXI* (*energy efficiency existing ship index*), ο οποίος προτάθηκε από τον *IMO* και από το 2023 όλα τα πλοία (νέα ή παλαιά) θα πρέπει να έχουν πάρει την πιστοποίηση του δείκτη *EEXI* έστω μια φορά. Ο συγκεκριμένος δείκτης συνδέεται κυρίως με τη σχεδίαση του πλοίου και αποτελεί ένα από τα μέτρα μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Όπως και στην περίπτωση του δείκτη *EEDI*, αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη αποδεκτή τιμή του, *the required EEXI*, η οποία καθορίζεται από δεδομένα σχετικά με τον τύπο του πλοίου, την χωρητικότητα και το σύστημα πρόωσης του και στη συνέχεια για κάθε πλοίο υπολογίζεται η τιμή του *attained EEXI*. Οι υπολογισμοί είναι ανάλογοι με αυτούς του δείκτη *EEDI*, ενώ διαφέρουν οι τιμές του συντελεστή μείωσης, ο οποίος είναι μικρότερος, καθώς για την πλειοψηφία των κατηγοριών, απαιτείται να επιτύχουν τους στόχους της φάσης 2 του δείκτη *EEDI*. Επιπλέον, μια άλλη διαφορά κατά τον υπολογισμό του δείκτη *EEXI* είναι η ισχύς των κύριων μηχανών που λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό, καθώς στην περίπτωση που ένα πλοίο χρειάζεται να περιορίσει την ισχύ στην προπέλα για να καλύψει τις απαιτήσεις του δείκτη, στον υπολογισμό εισέρχεται το 83%

της περιορισμένης ισχύος. Η τιμή αυτή δεν πρέπει να είναι χαμηλότερη από το 75% της ονομαστικής ισχύος των κύριων μηχανών [42].

Ένα επιπλέον μέτρο αντιμετώπισης των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου είναι ο δείκτης *Carbon intensity indicator – CII*, όπου με βάση τον συγκεκριμένο δείκτη γίνεται κατάταξη των πλοίων σε πέντε επιμέρους κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης. Ο δείκτης *CII* αποτελεί μέρος του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας και η μονάδα μέτρησης του είναι ίδια με αυτή του δείκτη *EEDI*, όμως δεν είναι δυνατή η σύγκριση των τιμών των ανωτέρω δεικτών, καθώς ο δείκτης *CII* υπολογίζεται σε ετήσια βάση σύμφωνα με τα στοιχεία της πραγματικής κατανάλωσης καυσίμου, ενώ για το δείκτη *EEDI* υπολογίζονται οι θεωρητικές τιμές των καυσίμων που απαιτούνται για δεδομένα ταξίδια.

#### **4.3 Μελλοντικές προτάσεις**

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, καταλήγουμε στις ακόλουθες προτάσεις, καθώς το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής είναι πλέον ορατό και οι επιπτώσεις των συνεπειών των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς και θα πρέπει να ληφθούν συνολικά μέτρα αντιμετώπισης. Στον κλάδο της ναυτιλίας, ο *IMO*, καθώς και οι αρμόδιες επιτροπές για την προστασία του περιβάλλοντος, από το 2008 και μετά έχουν προβεί σε σημαντικά μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων.

Στο κεφάλαιο 2, έγινε εκτενής αναφορά στα τεχνολογικά και λειτουργικά μέτρα σχετικά με τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των νέων πλοίων, με το μέτρο της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων να αποτελεί ίσως το σημαντικότερο των τεχνικών μέτρων. Η χρήση υβριδικού συστήματος πρόωσης αναπτύσσεται ήδη τη τελευταία δεκαετία, με τη μετάβαση σε πλήρως ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης να αποτελεί ίσως το σημαντικότερο βήμα. Επιπλέον, η ανάπτυξη συστημάτων περιορισμού των ενεργειακών απωλειών, καθώς και διαχείρισης των συστημάτων ανάκτησης θερμότητας,



είναι κάποια από τα τεχνολογικά μέτρα που αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια και είναι μέτρα χαμηλότερου κόστους.

Η ενεργειακή απόδοση και η ανάγκη μείωσης των εκπομπών ρύπων, πρέπει πρωτίστως να γίνει αποδεκτή από τα ενδιαφερόμενα μέρη του κλάδου. Είναι σημαντικό όλοι όσοι σχετίζονται με τη ναυτιλία να έχουν πλήρη γνώση της ανάγκης βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η μετάβαση σε ένα μέλλον μηδενικών εκπομπών, είναι συνολική ευθύνη. Η αναδιάρθρωση των ναυτικών διαδρομών και δρομολογίων είναι απαραίτητη, έτσι ώστε να εφαρμοστούν τα λειτουργικά μέτρα πλοήγησης με βάση τις καιρικές συνθήκες και της συμφόρησης. Τέλος, χρήση συστημάτων και λογισμικών παρακολούθησης της απόδοσης θα συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της ταχύτητας όπου είναι εφικτό, όμως θα πρέπει να πραγματοποιηθεί επανεκπαίδευση του εργατικού δυναμικού, ώστε να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά τα νέα αυτά συστήματα.

## Βιβλιογραφία

- [1]. Arrhenius, S. (1896), 'On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground', *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5(41), pp 237-276
- [2]. Greenhouse Effect, διαθέσιμο σε <https://www.nrdc.org/stories/greenhouse-effect-101#whatis>, ημερομηνία ανάκτησης 22/12/2022
- [3]. The greenhouse effect, διαθέσιμο σε <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/greenhouse-effect>, ημερομηνία ανάκτησης 22/12/2022
- [4]. Φωτιάδη, Α. (2015), 'Τα αέρια του θερμοκηπίου και η επίδραση τους στο ενεργειακό ισοζύγιο', διδακτικές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [5]. Climate change: Atmospheric Carbon Dioxide, διαθέσιμο σε <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>, ημερομηνία ανάκτησης 24/6/2023
- [6]. Greenhouse Gas bulletin: Another year, another record, διαθέσιμο σε <https://public.wmo.int/en/media/press-release/greenhouse-gas-bulletin-another-year-another-record>, ημερομηνία ανάκτησης 24/6/2023
- [7]. Walker, T. (2016), 'Green marine: An environmental program to establish sustainability in marine transportation', *Marine Pollution Bulletin*, 105, pp 199-207
- [8]. Pham, T. & Nguyen, P. (2015), 'Solution to reduce air environmental pollution from ships', *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 9(2), pp 257-261
- [9]. Fourth Greenhouse Gas Study 2020, διαθέσιμο σε <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>, ημερομηνία ανάκτησης 29/12/2022
- [10]. IMO, (2020), 'Fourth IMO Greenhouse Gas case study', London
- [11]. India GHG Program, διαθέσιμο σε <https://www.indiaghgp.org/explaining-scope-1-2-3>, ημερομηνία ανάκτησης 29/12/2022

- [12]. European Commission, (2020), *Annual report on CO<sub>2</sub> Emissions from Maritime Transport*, Brussels
- [13]. Paivi, T. et. Al, (2022), *Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options*, Elsevier Ltd
- [14]. IMO and the UNFCCC policy framework, διαθέσιμο σε <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Historic%20Background%20GHG.aspx>, ημερομηνία ανάκτησης 7/1/2023
- [15]. What is the Kyoto Protocol, διαθέσιμο σε [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol), ημερομηνία ανάκτησης 5/1/2023
- [16]. Λαμπρινού, Μ. (2018), *Η εφαρμογή του EEDI και EEOI στα πλοία της εμπορικής ναυτιλίας*, διπλωματική εργασία, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Ναυτιλία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς
- [17]. Issa, M. & Ilinca, A. & Martini, F. (2022), *Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions*, MDPI, Basel
- [18]. Tokuslu, A. (2020), *Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship*, International Journal of Environment and Geoinformatics, 7(2), pp 114-119
- [19]. Lloyd's Register, διαθέσιμο σε <https://www.lr.org/en/> ημερομηνία ανάκτησης 11/1/2022
- [20]. IMO, (2016), *Energy Efficient Ship Operation Module 2- Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines*, London
- [21]. IMO, (2020), *Fourth IMO Greenhouse Gas case study*, London
- [22]. Greenvoyage2050, (2022), *A practical guide to the selection of energy efficiency technologies for ships*, IMO, United Kingdom
- [23]. Prins, H. et al (2016), *Green retrofitting through optimisation of hull-propulsion interaction*, Transportation Research Procedia, 14, pp 1591-1600
- [24]. Fotopoulos, G. & Margaris, P. (2022), *Computational analysis of air lubrication system for commercial shipping and impacts of fuel consumption*, Computation 2020, 8(2)
- [25]. How Air Lubrication System for Ships Works? , διαθέσιμο σε <https://www.marineinsight.com/green-shipping/how-air-lubrication-system-for-ships-work/>, ημερομηνία ανάκτησης 2/3/2023

- [26]. Lindstand, E. & Ingebrigsten, T. (2018), '*Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements*', Transportation Research Part D 63, pp 276-290
- [27]. Diaz-Secades, L. & Gonzalez, R. & Rivera, N. (2022), '*Waste heat recovery from marine main medium speed engine block. Energy, exergy, economic and environmental (4E) assessment- Case study*', Ocean Engineering, 264
- [28]. Five important energy recovery systems used on ships, διαθέσιμο σε <https://www.marineinsight.com/tech/5-important-energy-recovery-systems-used-on-ships/>, ημερομηνία ανάκτησης 1/3/2023
- [29]. ECLAC, (2013), '*Measures to improve energy efficiency in shipping*', Fal Bulletin, 324(8)
- [30]. Late great engineers: William Robert Grove-Inventor of the hydrogen fuel cell, διαθέσιμο σε <https://www.theengineer.co.uk/content/in-depth/late-great-engineers-william-robert-grove-inventor-of-the-hydrogen-fuel-cell/>, ημερομηνία ανάκτησης 24/6/2023
- [31]. Fuel cell price to drop 70-80% as production volume scales , διαθέσιμο σε <https://blog.ballard.com/fuel-cell-price-drop> , ημερομηνία ανάκτησης 10/3/2023
- [32]. FCS Alterwasser: The first ship powered by hydrogen fuel cells, διαθέσιμο σε <https://www.greenoptimistic.com/fcs-alsterwasser-the-first-ship-powered-by-hydrogen-fuel-cells-20121024/>, ημερομηνία ανάκτησης 10/3/2023
- [33]. Plomaritou, E. & Papadopoulos, A. (2017), '*Shipbroking and chartering practice*', Taylor and Francis Group, London
- [34]. Adland, R. & Jia, H. (2017), '*Simulating physical basis risks in the Capesize freight market*', Maritime Economics and Logistics, 19 (2), pp 196-210
- [35]. Cariou, P. & Ferrari, C. & Parola, F. & Tei, A. (2019), '*Slow steaming in the maritime industry*', Routledge,
- [36]. Global Environment Facility, (2021), '*Impact of ships biofouling on Greenhouse Gas Emissions*', GloFouling Partnerships
- [37]. Marpol Annex VI. (2020), '*Prevention of air pollution from ships*', IMO

- [38]. SEEMP PART III, διαθέσιμο σε <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/seemp-part-iii/index.html>, ημερομηνία ανάκτησης 16/3/2023
- [39]. MEPC . (2019), '*Guidelines on survey and certification of the energy efficiency index*', IMO
- [40]. Procedure for calculation and verification of the Energy Efficient Index, διαθέσιμο σε [www.iacs.org.uk](http://www.iacs.org.uk), ημερομηνία ανάκτησης 10/3/23
- [41]. Annex – 2014 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, διαθέσιμο σε <https://www.imorules.com/GUID-507FC12C-452D-4925-8D8E-052333B40148.html>, ημερομηνία ανάκτησης 10/3/2023
- [42]. EEXI and CII- what you need to know, διαθέσιμο σε <https://www.alfalaval.com/microsites/puresox/compliance-blog/eexi-and-cii-what-you-need-to-know/>, ημερομηνία ανάκτησης 22/3/2023