



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΥΠΟΓΡΑΦΗΣ ΕΝΟΣ ΠΛΟΙΟΥ»**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Ορφανού Γεωργίου

Επιβλέπων

Χουντάλας Δημήτριος, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων
Μηχανικών

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

Πίνακας περιεχομένων

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΑΓΓΛΙΚΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΔΕΙΚΤΗΣ EEDI.....	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Δείκτης EEDI – Ιστορική Εξέλιξη.....	10
1.3 Επεξήγηση όρων	15
1.4 Μεθοδολογία υπολογισμού EEDI δείκτη	19
1.5 Δείκτης EEOI.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ EEDI.....	27
2.1 Εισαγωγή	27
2.2 Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας από τα καυσαέρια (Waste Heat Recovery System).....	29
2.3 Αντλίες και Ανεμιστήρες Μεταβλητών Στροφών	35
2.4 Βελτιστοποίηση του συστήματος κλιματισμού με χρήση Variable Frequency Drive σε αντλίες, συμπιεστές και ανεμιστήρες.....	38
2.5 Βελτιστοποίηση Κύριας Μηχανής για μικρότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC).....	44
2.6 Βελτιστοποίηση συνεργασίας πλοίου-προπέλας	49
2.7 Χρήση συστήματος Air Lubrication στη γάστρα για μειωμένες τριβές.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ EEDI	59
3.1 Εισαγωγή	59
3.2 EEDI Vessel 1-Tanker	59
3.3 EEDI Vessel 2-Containership	61
3.4 EEDI Vessel 3-Bulk carrier	63
3.5 Εφαρμογή Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας από τα Καυσαέρια	64
3.6 Εφαρμογή μέτρων βελτιστοποίησης σημείου λειτουργίας Κύριας Μηχανής	65
3.7 Εφαρμογή μέτρων βελτιστοποίησης συνεργασίας πλοίου-προπέλας και συστήματος Air Lubrication	66
3.8 Εφαρμογή Variable Frequency Drive σε αντλίες και ανεμιστήρες	68
3.9 Αποτελέσματα.....	69
3.10 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	«Δυνατότητες βελτίωσης της ενεργειακής υπογραφής ενός πλοίου»
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Ορφανός Γεώργιος
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Χουντάλας Δημήτριος, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2015-2016

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να διερευνηθούν και να εξεταστούν οι δυνατότητες βελτίωσης της ενεργειακής υπογραφής ενός πλοίου. Η ενεργειακή υπογραφή ενός πλοίου αποτυπώνεται με τον δείκτη EEDI σε $gr\ CO_2/tonne \cdot mile$. Αρχικά παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη αυτού του δείκτη και εξηγείται ο τρόπος υπολογισμού του καθώς και ο τρόπος υπολογισμού των γραμμών αναφοράς για κάθε τύπο πλοίου (tanker, containership, επιβατηγών). Έπειτα παρουσιάζονται και αναλύονται τεχνικά μέτρα των οποίων η εφαρμογή σε υφιστάμενα πλοία θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποδοτικότερη λειτουργία τους, εξοικονόμηση καυσίμων και τελικά μειωμένη εκπομπή ρύπων. Είναι μέτρα που σκοπός τους είναι είτε να βελτιστοποιήσουν την λειτουργία ορισμένων ενεργοβόρων μηχανημάτων είτε να εκμεταλλευτούν ενέργεια που μέχρι πριν έμενε ανεκμετάλλευτη. Στο επόμενο στάδιο της εργασίας, συγκεντρώνονται τα απαραίτητα στοιχεία για τρία είδη πλοίου και υπολογίζεται η τιμή του EEDI. Στη συνέχεια θεωρείται ότι εφαρμόζεται κάθε ένα τεχνικό μέτρο από αυτά που αναφέρθηκαν και υπολογίζεται εκ νέου ο δείκτης. Οι απαραίτητες συγκρίσεις γίνονται όχι μόνο σε σχέση με την προηγούμενη τιμή αλλά και μεταξύ των διαφορετικών μέτρων που εφαρμόζονται. Σκοπός είναι να δειχθεί κατά πόσο η εφαρμογή ενός μέτρου οδηγεί τελικά στη μείωση των εκπομπών ρύπων, ποιο μέτρο είναι πιο αποδοτικό σε αυτή την κατεύθυνση αλλά και αν ο τύπος πλοίου επηρεάζει την αποδοτικότητα του κάθε μέτρου.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή κεντρικό θέμα είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων βελτίωσης της ενεργειακής υπογραφής ενός πλοίου η οποία εκφράζεται μέσω του δείκτη EEDI. Μέχρι το 2008 δεν υπήρχε στην Ναυτιλία κάποιος κανονισμός για τις προδιαγραφές που θα έπρεπε να πληρούνται από τα πλοία σχετικά με τις εκπομπές ρύπων. Το 2008 λοιπόν ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός IMO, θέσπισε τον δείκτη EEDI ο οποίος εκφράζει την αποδοτικότητα του σχεδιασμού του πλοίου. Αντιπροσωπεύει δηλαδή το περιβαλλοντικό κόστος που έχει η λειτουργία ενός πλοίου συγκριτικά με το κοινωνικό όφελος της μεταφοράς αγαθών ή ανθρώπων. Αφού παρουσιαστεί η ιστορική εξέλιξη του δείκτη από το 2008 έως το 2014 που παίρνει και την τελική του μορφή, στη συνέχεια εξηγείται πώς προσδιορίζονται και υπολογίζονται οι παράγοντες του δείκτη για τις περιπτώσεις διαφορετικών τύπων πλοίου. Παρουσιάζονται επίσης οι γραμμές αναφοράς σύμφωνα με τις οποίες πρέπει να συγκρίνεται η τιμή του δείκτη κάθε πλοίου.

Αμέσως μετά παρουσιάζονται τεχνικά μέτρα που η εφαρμογή τους σε υπάρχοντα πλοία θα μπορούσε να βελτιώσει την τιμή του EEDI. Τα τεχνικά μέτρα αυτά έχουν σαν σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και συνεπώς καυσίμων, η καύση των οποίων είναι υπεύθυνη για την εκπομπή ρύπων προς το περιβάλλον. Εξετάζεται η περίπτωση Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας από τα καυσάερια της Κύριας Μηχανής για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Όπως και η εφαρμογή συστήματος VFD σε αντλίες και ανεμιστήρες καθώς και στο σύστημα κλιματισμού, μέτρο που σαν σκοπό έχει να περιορίσει την ηλεκτρική κατανάλωση αυτών των συσκευών, οι οποίες λειτουργούν προσφέροντας ενέργεια πολύ περισσότερη από την απαιτούμενη. Επίσης παρουσιάζονται μέτρα που βελτιστοποιούν τη λειτουργία της Κύριας Μηχανής. Επειδή είναι πολύ

συχνό φαινόμενο το προφίλ λειτουργίας του πλοίου να μην συμπίπτει με το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της μηχανής, τότε υπάρχει δυνατότητα μετατόπισης του σημείου αυτού. Παρουσιάζονται ακόμη μέτρα που στόχο έχουν την βελτιστοποίηση της συνεργασίας πλοίου-προπέλας, επηρεάζοντας τον τρόπο που το νερό της θάλασσας την διαπερνά. Αυτά απαιτούν επεμβάσεις στο hull του πλοίου, όχι όμως μεγάλης έκτασης. Το τελευταίο μέτρο που αναφέρεται είναι το σύστημα Air Lubrication, το οποίο δημιουργεί ένα στρώμα αέρα κάτω από το πλοίο, που σκοπό έχει να μειώσει τις τριβές κατά την κίνηση του στο νερό.

Στο επόμενο μέρος της εργασίας έχει γίνει ο υπολογισμός του δείκτη EEDI για τρία πλοία ξεχωριστού τύπου: Tanker, Containership και Bulk Carrier. Έπειτα θεωρείται πως εφαρμόζονται ένα-ένα αυτά τα μέτρα που αναφέρθηκαν και υπολογίζεται ξανά ο δείκτης τους, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά τις αλλαγές στις τιμές που επιφέρει η εφαρμογή των μέτρων. Σκοπός είναι να παρουσιαστεί πώς η εφαρμογή ενός μέτρου βελτιώνει την τιμή του δείκτη και κατά ποιο ποσοστό και να γίνει σύγκριση τόσο μεταξύ των μέτρων σε κάθε πλοίο, όσο και στις διαφορές που παρουσιάζει η εφαρμογή του ίδιου μέτρου σε πλοία διαφορετικού τύπου. Παρουσιάζονται πίνακες και διαγράμματα για πιο εύκολη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έπειτα τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται και σχολιάζονται ως προς την απόδοσή τους. Τέλος, παρουσιάζονται γενικά συμπεράσματα που εξάγονται από την εργασία καθώς και οι προοπτικές εξέλιξής της μελλοντικά.

POST-GRADUATE THESIS: **“Possibilities for optimizing the energy efficiency of a vessel”**

STUDENT: **Georgios Orfanos**

SUPERVISOR: **Dimitrios T. Hountalas**

ACADEMIC YEAR: **2015-2016**

Abstract

The aim of this thesis is to examine possibilities for optimizing the energy efficiency of a vessel. The energy efficiency of a vessel can be represented with the EEDI formula (Energy Efficiency Design Index) in gr CO₂/tonne*mile. It actually shows the environmental cost of the vessel's operation compared to the social benefit of transporting goods. Firstly, the historical background of how the EEDI was developed through the years is presented, followed by the calculations for the reference lines of each ship type. Then, technical measures are presented whose implementation in already built vessels could lead to a more efficient operation, fuel savings and eventually less air pollution. These are measures which either optimize the operation of components with high energy consumption or recover energy from waste heat. At the last part of this thesis, specifications of three different types of vessel are collected and their EEDI is calculated. Furthermore, it is supposed that each one of the technical measures is implemented and the EEDI is recalculated. Not only the values between new and old EEDI are compared, but also the impact of the implementation of different measures. Final aim is to be shown if the implementation of every measure does lead to less air pollution, in which way is more efficient and if it defers between ship types.

Summary

In this Thesis, the main subject is to investigate the possibilities for optimizing the energy efficiency of a vessel, which is expressed by the Energy Efficiency Design Index EEDI. Until 2008, there was no regulations or guidelines in Maritime defining the standards that should be followed from vessels regarding the air pollution. It was then when the International Maritime Organization IMO introduced the EEDI. This Index represents the environmental cost of a vessel's operation compared to the social benefit of transporting goods. Firstly, it is presented the development of this Index from its first formula in 2008 until the final one in 2014. Then guidelines for calculating the Index are presented, as well as the reference lines for the different types of ships.

At the next chapter, technical measures are listed, whose implementation in already built vessels could improve their EEDI value. These measures aim to fuel savings, fuel that is responsible for the environmental pollution. The Waste Heat Recovery System is investigated as a way to produce electrical power. The implementation of Variable Frequency Drive in pumps and fans, as well as in the HVAC system, aims to reduce the power consumption of these components which usually operate in 100% even if the energy demand is not that high. Moreover, ways of optimizing the Main Engine's operation are stated. Vessel's operational profile does not always meet Engine's optimization point, so there is the need of changing it in order to reduce its Specific Fuel Oil Consumption. Furthermore, methods of improving ship's resistance and optimizing the interaction between the hull and the propeller are examined. Their aim is to reduce hull resistance and improve propeller's efficiency leading to a more efficient voyage. Last but not least, Air Lubrication System is presented, as another way to reduce hull resistance.

Following, EEDI value is calculated for three different ship types: a Tanker, a Containership and a Bulk Carrier. Then, EEDI is recalculated, assuming that each time one of the above technical measures is implemented. The reason is to find out if and how much the implementation of each measure improves the EEDI value and compare not only between them but also the differences in applying the same measure in other type of vessel. Diagrams and charts are presented for easier comparison. The results are commented regarding their efficiency. Finally, general findings are presented as well as proposals for future development of the Thesis.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΕΙΚΤΗΣ EEDI

1.1 Εισαγωγή

Από την αρχαιότητα μέχρι και σήμερα, οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν έναν από τους βασικούς τρόπους μετακίνησης των ανθρώπων και τον κυριότερο τρόπο μετακίνησης προϊόντων. Η ανάπτυξη της ναυτιλίας συνέβαλε αποφασιστικά στην ανάπτυξη του εμπορίου και κατ' επέκταση της οικονομίας. Από το μικρό και περιορισμένο τοπικό επίπεδο, χάρη στη ναυτιλία, το εμπόριο και οι συναλλαγές επεκτάθηκαν σε εθνικό και αργότερα σε διεθνές επίπεδο. Σήμερα, υπολογίζεται ότι το 90% του όλο και αυξανόμενου παγκόσμιου εμπορίου διεξάγεται μέσω θαλάσσης κι αυτό γιατί είναι ο πιο οικονομικός και αποδοτικός τρόπος μετακίνησης φορτίων.

Τα τελευταία χρόνια επίσης, είναι όλο και αυξανόμενη η ανησυχία της διεθνούς κοινότητας για την κλιματική αλλαγή και τις συνέπειές της στον πλανήτη μας. Η αύξηση της θερμοκρασίας, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η υποβάθμιση της ατμοσφαιρικής ποιότητας από εκπεμπόμενους ρύπους είναι προβλήματα που βρίσκονται υψηλά στην ημερήσια διάταξη κυβερνήσεων και διεθνών οργανισμών. Γι' αυτό το λόγο άλλωστε έχουν θεσμοθετηθεί κατά καιρούς κανόνες και περιορισμοί στις ανθρώπινες δραστηριότητες που ως αποτέλεσμα τους είναι η επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Από αυτούς τους κανόνες και περιορισμούς δε θα μπορούσε να λείπει η ναυτιλία.

Ήταν το 1992 όταν η Επιτροπή του Ο.Η.Ε για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) έβαλε τις βάσεις για τη σταθεροποίηση της γήινης ατμόσφαιρας θέτοντας περιορισμούς σε συγκεκριμένους αέριους ρύπους (GHG, Green House Gases). Στη συνέχεια, με το Πρωτόκολλο του Κιότο το 1997, συμφωνήθηκε ο περιορισμός συγκεκριμένων αερίων ρύπων όπως CO₂, CH₄, N₂O, PFCs, HFCs και SF₆ από τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες σε συγκεκριμένα ποσοστά στην χρονική περίοδο από 2008-2012. Οι πιο σημαντικοί ρύποι που προέρχονται από τη ναυτιλία και είναι επικίνδυνοι για το περιβάλλον είναι το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, και τα οξείδια αζώτου και θείου, NO_x και SO_x.

Παρόλα αυτά, οι εκπομπές ρύπων από τη ναυτιλία δεν περιλαμβάνονταν σε κανένα από αυτά τα πρωτόκολλα και η ανάπτυξη τέτοιων κανονισμών είχε ανατεθεί από τον Ο.Η.Ε στον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό IMO (International Maritime Organization). Ο IMO δημιουργήθηκε το 1945 με σκοπό το συντονισμό και τη βελτίωση θεμάτων της Ναυτιλίας και την προώθηση σχετικών Συμβάσεων. Μια τέτοια Σύμβαση είναι η Διεθνής Σύμβαση για την Αποφυγή Ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL). Από το 1973 μέσα από τις Επιτροπές για την Προστασία του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC, Marine Environment Protection Committees) συντονίζονται θέματα σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος. Αυτοί οι οργανισμοί και επιτροπές εστίασαν το ενδιαφέρον τους στον

περιορισμό των παραπάνω ρύπων δημιουργώντας δείκτες και περιορισμούς που θα πρέπει να τηρούνται από τα πλοία. Ο πιο σημαντικός δείκτης και για τον οποίο θα αναφερθούμε εκτενώς στην παρούσα εργασία είναι ο δείκτης EEDI (Energy Efficiency Design Index), Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Σχεδιασμού.

1.2 Δείκτης EEDI – Ιστορική Εξέλιξη

Ο δείκτης EEDI εκφράζει την αποδοτικότητα του σχεδιασμού ενός πλοίου σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ που εκπέμπεται κατά τη λειτουργία του. Συγκεκριμένα μετριέται σε γραμμάρια εκπεμπόμενου CO₂ ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου (tonne) ανά μονάδα απόστασης (nautical mile). Με απλά λόγια δείχνει το περιβαλλοντικό κόστος που έχει η λειτουργία ενός πλοίου, σε σχέση με το κοινωνικό όφελος της μεταφοράς των αγαθών.

Η απλοποιημένη μαθηματική μεταφορά των παραπάνω, έχει ως εξής:

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emission}}{\text{transport work}}$$

Πάνω σε αυτή τη λογική αναπτύχθηκε και τελειοποιήθηκε από τον IMO και τις αντίστοιχες επιτροπές MEPC ο δείκτης EEDI, μέχρι να αποκτήσει την τελική σημερινή μορφή του. Η εξέλιξή του αυτή, από το 2008 που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά, μέχρι σήμερα, παρουσιάζεται στη συνέχεια.

MEPC 57/4/12

Τον Απρίλιο του 2008 στη σύνοδο MEPC 57/4/12, πρωτοπαρουσιάστηκε ο EEDI με αρχική ονομασία «δείκτης εκπομπών CO₂» από την Ιαπωνία, και αντιπροσώπευε τα εκπεμπόμενα γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενο έργο (g CO₂ / tonne-mile). Ο δείκτης αναπτύχθηκε ώστε να γίνει εφικτή μια πρώτη αξιολόγηση της αποδοτικότητας στο σχεδιασμό των πλοίων μέσω μιας εύκολης διαδικασίας υπολογισμού και ικανής να επεκταθεί σε ευρύτερο πλαίσιο. Σε αυτό το σημείο Ιαπωνία και Δανία ανέλαβαν να παρουσιάσουν υποχρεωτικούς δείκτες εκπομπών CO₂ στην επικείμενη συνάντηση της Ομάδας Εργασίας για τις Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου από τα Πλοία (Working Group on Greenhouse Gas Emissions from Ships). Η μορφή της εξίσωσης που προέκυψε ήταν απλουστευμένα η εξής:

$$\text{Attained } CO_2 \text{ index} = \frac{C_F * SFC * P}{\text{Capacity} * V_{ref}} \quad (1.1)$$

Πάνω στη σχέση 1.1, η Δανία προσπάθησε να χωρίσει τις εκπομπές CO₂ ανάλογα με την προέλευσή τους, αν προέρχονται δηλαδή από την Κύρια Μηχανή πρόωσης του πλοίου ή από τις Βοηθητικές, και ταυτόχρονα εισήγαγε τους παράγοντες με τους οποίους λαμβάνονται υπόψιν και ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου που θέτουν τεχνικά όρια στην χωρητικότητα (π.χ για τα πλοία που είναι κατάλληλα να πλέουν σε συνθήκες πάγου). Παρουσιάστηκε η εξίσωση 1.2:

$$Attained CO2 index = \frac{\prod_{j=1}^M f_j \sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi} + \prod_{k=1}^L f_k \sum_{i=1}^{NAE} C_{FAEi} * SFC_{AEi} * P_{AEi}}{Capacity * Vref} \quad (1.2)$$

MEPC 58/4

Σε αυτή τη σύνοδο τον Οκτώβρη του 2008, η σχέση 1.2 εμπλουτίστηκε με έναν ακόμα παράγοντα για την επίδραση των καιρικών συνθηκών, έπειτα από εισήγηση της Ιαπωνίας.

$$Attained CO2 index = \frac{\prod_{j=1}^M f_j \sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi} + \prod_{k=1}^L f_k \sum_{i=1}^{NAE} C_{FAEi} * SFC_{AEi} * P_{AEi}}{Capacity * Vref * f_w} \quad (1.3)$$

Οι Η.Π.Α πρότειναν να εισαχθεί ένας ακόμη παράγοντας που θα αφορούσε τις τεχνολογίες και εφαρμογές που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και πλέον η εξίσωση διαμορφώθηκε ως:

$$Attained CO2 index = \frac{\prod_{j=1}^M f_j \sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi} + \prod_{k=1}^L f_k \sum_{i=1}^{NAE} C_{FAEi} * SFC_{AEi} * P_{AEi}}{Capacity * Vref * f_w} - \frac{\sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{Feff} * SFC_{eff} * P_{eff}}{Capacity * Vref * f_w} \quad (1.4)$$

Με τα συμπεράσματα της συνόδου, ο δείκτης αυτός ονομάστηκε πλέον EEDI, Energy Efficiency Design Index. Παράλληλα προστέθηκε ακόμη ένας όρος στον αριθμητή που αφορά στις μηχανές και στην μείωση κατανάλωσης λόγω εφαρμογής τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια και ένας παράγοντας στον παρονομαστή εκφράζοντας τα τεχνικά όρια στη χωρητικότητα. Έτσι η εξίσωση έγινε:

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi}) + C_{FAE} * SFC_{AE} * P_{AE} + (\sum_{i=1}^n P_{PTi} - \sum_{i=1}^n P_{WHR})}{Capacity * Vref * f_w * f_i} - \frac{\sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{Feff} * SFC_{eff} * P_{eff}}{Capacity * Vref * f_w * f_i} \quad (1.5)$$

Συγχρόνως με τον EEDI, ο οποίος αφορά στο σχεδιασμό καινούργιων πλοίων, αναπτύχθηκε στη σύνοδο αυτή κι ένας δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Λειτουργίας κατάλληλος για όλα τα πλοία, ο EEOI Energy Efficiency Operational Index καθώς επίσης και ένα πλάνο αποδοτικότερης διαχείρισης των ενεργειακών λειτουργιών των πλοίων.

MEPC 59

Τον Ιούλιο του 2009 η εξίσωση του EEDI αναπροσαρμόζεται ελαφρώς και παίρνει μορφή, η οποία δίνεται στη συνέχεια:

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi}) + C_{FAE} * SFC_{AE} * P_{AE}}{Capacity * V_{ref} * f_w * f_i} + \frac{((\prod_{j=1}^M f_j * \sum_{i=1}^n P_{PTIi} - \sum_{i=1}^n f_{eff} P_{AEffi}) * C_{FAE} * SFC_{AE}) - \sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{Feff} * SFC_{eff} * P_{eff}}{Capacity * V_{ref} * f_w * f_i} \quad (1.6)$$

Συμφωνήθηκε να χρησιμοποιείται αυτή η εξίσωση 1.6 και να δοκιμασθεί εθελοντικά σε καινούργια πλοία για να αποκτηθεί εμπειρία στον υπολογισμό του καθώς επίσης δόθηκαν οδηγίες για την ανάπτυξη ενός Πλάνου Διαχείρισης, του Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) και οδηγίες για την εθελοντική εφαρμογή του ο EEOI Energy Efficiency Operational Index σε νέα αλλά και σε υπάρχοντα πλοία. Τέλος δόθηκε με λεπτομέρειες ο τρόπος υπολογισμού του EEDI αλλά και ο τρόπος έλεγχος και επαλήθευσης από ανεξάρτητους φορείς.

MEPC 60

Τον Μάρτιο του 2010 συμφωνήθηκε να δημιουργηθεί μια ομάδα εργασίας που θα ασχοληθεί με τους τρεις δείκτες EEDI, EEOI και SEEMP και παρόλο που θα μπορούσε να φτιαχτεί ένα κείμενο με τις βασικές προϋποθέσεις που θα έπρεπε να τηρούνται για τον EEDI, κάποια θέματα που αφορούσαν το μέγεθος των πλοίων, τη χωρητικότητα, τον τρόπο μείωσης της ταχύτητας του πλοίου χρίζανε περαιτέρω διερεύνησης ώστε να καταστεί δυνατή μια συμφωνία στη βασική γραμμή αναφοράς του δείκτη για τον υπάρχοντα στόλο.

MEPC 61 & 62

Στην 61η σύνοδο, και οι τρεις δείκτες ήταν από άποψη μορφής έτοιμοι να εφαρμοσθούν. Παρόλα αυτά η υποχρεωτική εφαρμογή θα αποφασιζόταν στην επόμενη σύνοδο υπό νέα Σύμβαση. Έτσι, τον

Ιούλιο του 2011, στην 62η MEPC θεσπίστηκαν για πρώτη φορά τα standards για σημαντική μείωση των εκπομπών ρύπων από τη ναυτιλία τα επόμενα χρόνια. Ένα καινούργιο κεφάλαιο, το 4ο, προστέθηκε στην Annex VI, όπου ο EEDI έγινε υποχρεωτικός για κάθε νέο πλοίο και το SEEMP για όλα τα πλοία. Οι κανονισμοί αυτοί θα ισχύουν για όλα τα πλοία με tonnage μεγαλύτερο από 400 από τον Ιανουάριο του 2013. Για τα tankers το όριο αυτό είναι οι 4.000 dwt. Σύμφωνα με τους πιο πρόσφατους κανονισμούς επιτρέπεται επίσης η καθυστέρηση εφαρμογής των κανονισμών μέχρι 4 χρόνια, αφορά δηλαδή πλοία που το συμβόλαιο κατασκευής τους θα έχει υπογραφεί έως 1.1.2017. Τέλος οι παραπάνω κανονισμοί δε θα αφορούν πλοία που χρησιμοποιούν μηχανές diesel-electric, turbo ή υβριδικές για την πρόωση τους. [1], [2]

Στους παραπάνω αναφερόμενους κανονισμούς περιλαμβάνονται οι ορισμοί του επιτευχθέντος και απαιτούμενου EEDI για κάθε πλοίο. Ο απαιτούμενος ορίζεται να είναι αυτός που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς (reference line) για την φάση 0 (έως 31.12.2014), μειωμένος κατά 10% σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς για την φάση 1 (από 01.01.2015 έως 31.12.2019), μειωμένος κατά 20% σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς για την φάση 2 (από 01.01.2020 έως 31.12.2024) και μειωμένος κατά 30% σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς για την φάση 3 (από 01.01.2025 και μετά). Επτά συνολικά τύποι πλοίων περιλαμβάνονται στο πρώτο αυτό σχέδιο κανονισμών bulk carriers, tankers, gas tankers, container ships, general cargo vessels, refrigerated cargo vessels και combination carriers. Για τους υπόλοιπους τύπους οι περιορισμοί εισάχθηκαν σε επόμενους κανονισμούς. Ο συνοπτικός Πίνακας 1-1 για κάθε είδος πλοίου και τις 4 φάσεις εξέλιξης του δείκτη παρουσιάζεται στη συνέχεια. [3]

Ship Type	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
Bulk carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Gas carrier	10,000 DWT and above	0	10	20	30
	2,000 – 10,000 DWT	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 – 15,000 DWT	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 – 20,000 DWT	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*

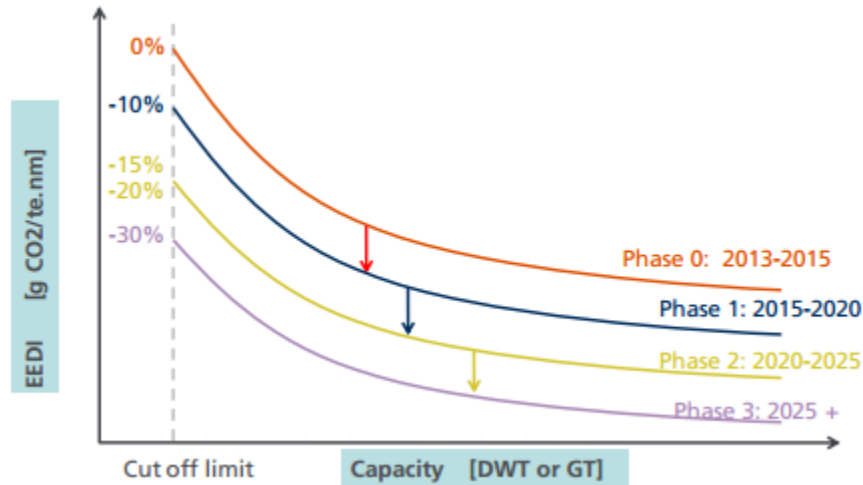
Πίνακας 1-1: Φάσεις εξέλιξης του δείκτη EEDI.

* Ο συντελεστής προκύπτει μέσω γραμμικής παρεμβολής ανάμεσα στις δύο τιμές εξαρτώμενες από το μέγεθος του πλοίου. Ο μικρότερος συντελεστής εφαρμόζεται στο μικρότερο πλοίο.

** Η 1^η φάση ξεκινά στις 1/9/2015

*** Αφορά πλοία κατασκευασμένα μετά την 1/9/2019

Οι παραπάνω φάσεις και η εξέλιξή τους φαίνονται συγκεντρωτικά στο Διάγραμμα 1-1. [3]



Διάγραμμα 1-1: Φάσεις εξέλιξης του δείκτη EEDI.

MEPC 66/21

Το 2014, η εξίσωση παίρνει την τελική της μορφή, η οποία χρησιμοποιείται έως και σήμερα:

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi}) + C_{FAE} * SFC_{AE} * P_{AE}}{f_i * f_c * f_l * Capacity * V_{ref} * f_w} + \frac{((\prod_{j=1}^M f_j * \sum_{i=1}^n P_{PTIi} - \sum_{i=1}^n f_{eff} P_{AEfffi}) * C_{FAE} * SFC_{AE}) - \sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{Feff} * SFC_{eff} * P_{eff}}{f_i * f_c * f_l * Capacity * V_{ref} * f_w} \quad (1.7)$$

Ουσιαστικά αυτό που προστέθηκε είναι δύο ακόμη διορθωτικοί παράγοντες στον παρονομαστή.

1.3 Επεξήγηση όρων

CF_{ME} και CF_{AE}

Πρόκειται για παράγοντες μετατροπής των γραμμαρίων καυσίμου που καταναλώνονται αντίστοιχα σε Κύριες Μηχανές και Βοηθητικές σε γραμμάρια CO_2 που εκπέμπονται στο περιβάλλον. Οι παράγοντες αυτοί εξαρτώνται από το είδος καυσίμου που χρησιμοποιείται και οι τιμές τους για τα βασικότερα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην Ναυτιλία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1-2.

Τύπος Καυσίμου	Προδιαγραφή	Περιεχόμενο σε C	Παράγοντας CF
Diesel/Gas Oil (MGO)	ISO 8217 Grades DMX through DMC	0.875	3.206

Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0.86	3.15104
Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME through RMK	0.85	3.1144
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane Butane	0.819 0.827	3.0 3.03
Liquefied Natural Gas (LNG)		0.75	2.75

Πίνακας 1-2: Παράγοντες μετατροπής καυσίμου.

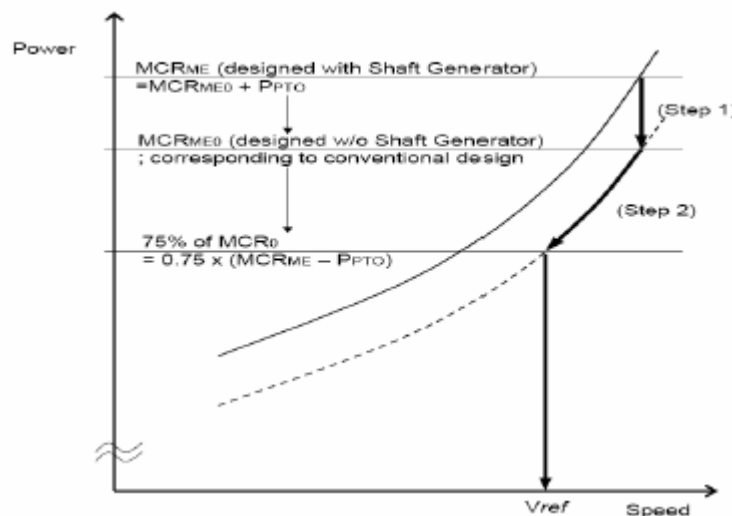
Ανάλογα με τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται κατά την δοκιμή, χρησιμοποιείται και ο αντίστοιχος συντελεστής για τον υπολογισμό του δείκτη EEDI.

SFC_{ME} και SFC_{AE}

Είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε gr/kWh για Κύριες Μηχανές και Βοηθητικές. Οι τιμές προκύπτουν από το πιστοποιητικό EIAPP σε συνδυασμό με τα NOx files της Μηχανής στο 75% του MCR (Maximum Continuous Rating) για την Κύρια Μηχανή και στο 50% για τις Βοηθητικές. Αν υπάρχουν μηχανές διαφορετικού τύπου, τότε χρησιμοποιείται ο μέσος όρος.

P_{ME} P_{AE} και P_{PTI}

Είναι οι τιμές της ισχύος της Κύριας Μηχανής στο 75% του MCR σε kW μείον την ισχύ από οποιοδήποτε κινητήρα συνδεδεμένο στον άξονα. [2]



Διάγραμμα 1-2: Τρόπος εύρεσης του 75% MCR.

Η ισχύς από τις Βοηθητικές μηχανές υπολογίζεται ως ποσοστό του MCR της Κύριας Μηχανής, από μια εμπειρική σχέση που αντιπροσωπεύει όλες τις ηλεκτρικές καταναλώσεις για τις λειτουργίες του πλοίου και τη φιλοξενία του προσωπικού. Η σχέση αυτή διαμορφώνεται ελαφρώς στην περίπτωση που η εγκατεστημένη ισχύς είναι μικρότερη των 10000Kw. Η σχέση υπολογισμού παρουσιάζεται στη συνέχεια.

$$P_{AE(MCRM E > 1000KW)} = (0.025 * \sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME}) + 250 \quad (1.8)$$

$$P_{AE(MCRM E < 1000KW)} = (0.05 * \sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME}) \quad (1.9)$$

P_{eff} PAE_{eff} και f_{eff}

Είναι η ισχύς των καινοτόμων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται και οδηγούν σε μειώσεις μηχανικής ή ηλεκτρικής ισχύος. Ο παράγοντας f_{eff} χρησιμοποιείται ως παράγοντας διαθεσιμότητας και αντιπροσωπεύει το ποσοστό του χρόνου πλεύσης που η τεχνολογία αυτή είναι διαθέσιμη.

V_{ref}

Είναι η ταχύτητα του πλοίου σε έμφορτη κατάσταση που αντιστοιχεί στη χωρητικότητα όπως αυτή ορίζεται παρακάτω, στο 75% του MCR, σε κανονικές καιρικές συνθήκες και σε βαθιά νερά.

Capacity Χωρητικότητα

Είναι ίση με το deadweight (tonnes) του πλοίου στο μέγιστο επιτρεπόμενο από την Σύμβαση Γραμμής Φόρτωσης βύθισμα (summer load line draft) για dry cargo carriers, tankers, gas tankers, general cargo vessels και ro-ro cargo. Για επιβατηγά πλοία και ro-ro επιβατηγά πρέπει να χρησιμοποιείται η χωρητικότητα όπως ορίζεται από την International Convention of Tonnage Measurement Of Ships 1969, Annex I, regulation 3. Για τα containerships η χωρητικότητα λαμβάνεται ίση με το 70% του deadweight (tonnes) του πλοίου.

Με τον όρο deadweight εννοείται η χωρητικότητα εκτοπίσματος. Προσδιορίζεται ως το μέγιστο συνολικό βάρος που μπορεί να μεταφέρει ασφαλώς το πλοίο σε φορτίο, εφόδια κ.ά. εφόσον διατηρεί το βύθισμα (γραμμή φόρτωσης) που προβλέπεται από τους ισχύοντες κανονισμούς σε νερό σχετικής πυκνότητας 1.025kg/m³. Από το συνολικό αυτό βάρος αν αφαιρεθεί το βάρος καυσίμων, εφοδίων (ύδατος, τροφίμων, κλπ) και έρματος προκύπτει το πραγματικό βάρος που μένει για το φορτίο δηλ. η πραγματική σε φορτίο μεταφορική ικανότητα του πλοίου, που ονομάζεται χωρητικότητα φορτίου.

f_i f_j f_c f_l και f_w

Ο f_j παράγοντας αντιπροσωπεύει τις συγκεκριμένες σχεδιαστικές ιδιαιτερότητες του σκάφους. Αφορά κυρίως πλοία σχεδιασμένα για πλεύση σε συνθήκες πάγου και η τιμή του για αυτά τα πλοία υπολογίζεται από τον Πίνακα 1-3 που ακολουθεί. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι μονάδα. [2]

Ship type	f_j	Limits depending on the ice class			
		IC	IB	IA	IA Super
Tanker	$\frac{0.516L_{PP}^{1.87}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{iME}}$	{max 1.0 min $0.72L_{PP}^{0.06}$ }	{max 1.0 min $0.61L_{PP}^{0.08}$ }	{max 1.0 min $0.5L_{PP}^{0.1}$ }	{max 1.0 min $0.4L_{PP}^{0.12}$ }
Dry cargo carrier	$\frac{2.15L_{PP}^{1.58}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{iME}}$	{max 1.0 min $0.89L_{PP}^{0.02}$ }	{max 1.0 min $0.78L_{PP}^{0.04}$ }	{max 1.0 min $0.68L_{PP}^{0.06}$ }	{max 1.0 min $0.58L_{PP}^{0.08}$ }
General cargo ship	$\frac{0.045L_{PP}^{2.37}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{iME}}$	{max 1.0 min $0.85L_{PP}^{0.03}$ }	{max 1.0 min $0.7L_{PP}^{0.06}$ }	{max 1.0 min $0.54L_{PP}^{0.1}$ }	{max 1.0 min $0.39L_{PP}^{0.15}$ }

Πίνακας 1-3: Τρόπος υπολογισμού παράγοντα f_j .

Ο παράγοντας f_i εκπροσωπεί οποιοδήποτε τεχνικό ή ρυθμιστικό όριο στην χωρητικότητα. Στην πραγματικότητα αφορά και αυτός όσα πλοία είναι για πλεύση σε συνθήκες πάγου. Ο επόμενος Πίνακας 1-4 δίνει τις τιμές του παράγοντα f_i σε αυτές τις περιπτώσεις. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η τιμή του λαμβάνεται επίσης ίση με τη μονάδα. [2]

Ship type	f_i	Limits depending on the ice class			
		IC	IB	IA	IA Super
Tanker	$\frac{0.00115L_{PP}^{3.36}}{capacity}$	max $1.31L_{PP}^{-0.05}$ min 1.0	max $1.54L_{PP}^{-0.07}$ min 1.0	max $1.8L_{PP}^{-0.09}$ min 1.0	max $2.1L_{PP}^{-0.11}$ min 1.0
Dry cargo carrier	$\frac{0.000665L_{PP}^{3.44}}{capacity}$	max $1.31L_{PP}^{-0.05}$ min 1.0	max $1.54L_{PP}^{-0.07}$ min 1.0	max $1.8L_{PP}^{-0.09}$ min 1.0	max $2.1L_{PP}^{-0.11}$ min 1.0
General cargo ship	$\frac{0.000676L_{PP}^{3.44}}{capacity}$	1.0	max 1.08 min 1.0	max 1.12 min 1.0	max 1.25 min 1.0
Container ship	$\frac{0.1749L_{PP}^{2.29}}{capacity}$	1.0	max $1.25L_{PP}^{-0.04}$ min 1.0	max $1.6L_{PP}^{-0.08}$ min 1.0	max $2.1L_{PP}^{-0.12}$ min 1.0
Gas tanker	$\frac{0.1749L_{PP}^{2.33}}{capacity}$	max $1.31L_{PP}^{-0.04}$ min 1.0	max $1.6L_{PP}^{-0.08}$ min 1.0	max $2.1L_{PP}^{-0.12}$ min 1.0	1.0

Πίνακας 1-4: Τρόπος υπολογισμού παράγοντα f_i .

Ο f_w είναι ένας παράγοντας που εκπροσωπεί τη μείωση στην ταχύτητα σε ορισμένες συνθήκες θάλασσας, ύψος και συχνότητα κυμάτων, ένταση αέρα κ.α. Μέχρις στιγμής δεν έχει ανακοινωθεί

κάποιος πίνακας που να περιλαμβάνει συγκεκριμένες τιμές για αυτόν το παράγοντα οπότε η τιμή του θεωρείται ίση με τη μονάδα. [2]

Ο f_c είναι συντελεστής διόρθωσης χωρητικότητας (cubic capacity) και θεωρείται ίσος με τη μονάδα. Διαφορετικός είναι σε περιπτώσεις πλοίων που μεταφέρουν χημικά ή LNG. [5]

Ο f_i είναι συντελεστής διόρθωσης για τα πλοία γενικού φορτίου τα όποια διαθέτουν γερανούς και άλλα εξαρτήματα που σχετίζονται με το φορτίο και για το λόγο αυτό η χωρητικότητα τους είναι μικρότερη από ότι θα μπορούσαν. [5]

1.4 Μεθοδολογία υπολογισμού EEDI δείκτη

Η Δανία ήταν εκείνη που στη MEPC 58/4/8 πρότεινε τη μεθοδολογία για την ανάπτυξη των εξισώσεων για τον δείκτη EEDI και ήταν η ίδια που στην GHG-WG 2/2/7, ενσωματώνοντας τις τελευταίες αναβαθμισμένες εκδόσεις των εξισώσεων παρείχε τις εξισώσεις για έξι διαφορετικούς τύπους πλοίων. Με στοιχεία πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βάση δεδομένων του Lloyd's Register αναπτύχθηκε μια αντιπροσωπευτική, βασική γραμμή EEDI, για σκάφη συγκεκριμένου τύπου από το 1998-2007,

Βέβαια, χρειάστηκαν να γίνουν κάποιες παραδοχές όσον αφορά στους παράγοντες που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις αυτές, και οι παραδοχές είναι οι παρακάτω:

CF_{ME} και CF_{AE}

Θεωρήθηκε πως χρησιμοποιείται ένας ενιαίος τύπος καυσίμου Heavy Fuel Oil και η τιμή του παράγοντα μετατροπής που χρησιμοποιήθηκε ήταν 3,13 gr CO₂ / gr καυσίμου.

SFC_{ME} και SFC_{AE}

Επειδή οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου δεν ήταν διαθέσιμες στα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν, θεωρήθηκε η τιμή των 190gr καυσίμου / kWh για όλες τις Κύριες Μηχανές και 210gr καυσίμου / kWh για τις βοηθητικές.

Ισχύς, Ταχύτητα, Χωρητικότητα

Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό κομμάτι, η ισχύς λαμβάνεται ίση με το 75% της MCR. Τιμές για την ισχύ όπως και για την ταχύτητα υπήρχαν στη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε. Για την χωρητικότητα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των deadweight που και αυτές ήταν διαθέσιμες.

P_{eff} PAE_{eff} και f_{eff}

Θεωρήθηκε ότι δεν χρησιμοποιείται καμία καινοτόμα τεχνολογία, ακόμα και αν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία.

f_i f_j f_c f_l και f_w

Όλοι οι διορθωτικοί παράγοντες τέθηκαν ίσοι με τη μονάδα.

Με βάση λοιπόν όλες αυτές τις παραδοχές, η εξίσωση του EEDI συνοψίζεται στην 1.10, η οποία έχει ως άγνωστες τις τιμές για την ισχύ στο MCR των μηχανών, τη χωρητικότητα και την ταχύτητα.

$$Average\ Index\ Value = 3.13 \frac{190 * \sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME} + 210 * P_{AE}}{Capacity * V_{ref}} \quad (1.10)$$

Έπειτα χαράσσεται μια ενιαία γραμμή αναφοράς αντιπροσωπεύοντας το μέσο όρο των τιμών:

$$Baseline\ value = a * Capacity^{-c} \quad (1.11)$$

Όμως Δανία και Ιαπωνία πρότειναν στην MEPC 60/4/7 ορισμένες βελτιώσεις στη διαδικασία. Οι σημαντικότερες διαφοροποιήσεις με την προηγούμενη μέθοδο είναι ότι πλέον ο παράγοντας μετατροπής CF έχει τιμή 3,1144 gr CO₂/gr καυσίμου από 3,13, η ειδική κατανάλωση για τις βοηθητικές μηχανές αυξήθηκε στα 215 gr/kWh, χρησιμοποιούνται στοιχεία από πλοία που ναυπηγήθηκαν από το 1999-2009. Επομένως μετά και αυτές τις αλλαγές, η εξίσωση 1.10 διαμορφώνεται ως εξής:

$$Average\ Index\ Value = 3.114 \frac{190 * \sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME} + 215 * P_{AE}}{Capacity * V_{ref}} \quad (1.12)$$

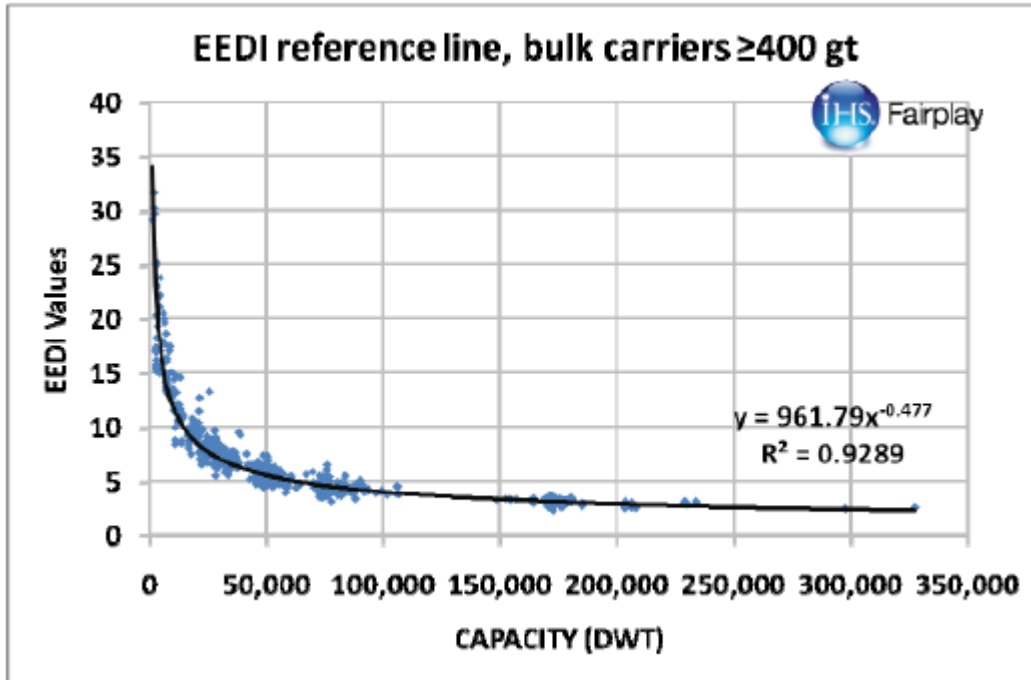
Στη συνέχεια, όπως παρουσιάζεται και στη MEPC 62/6/4 το 2011, ζητήθηκε να υπολογιστεί για τον υπάρχοντα στόλο με μέγεθος μεγαλύτερο από 400GRT ο δείκτης EEDI με βάση τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα στο Fairplay και σύμφωνα με την τελική μεθοδολογία που ήδη εξηγήθηκε. Έπειτα, με τα αποτελέσματα αυτά χαράχθηκαν οι γραμμές αναφοράς για τους διάφορους τύπους πλοίων. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για αυτούς τους υπολογισμούς φαίνονται στον Πίνακα 1-5, ενώ ακολουθούν και οι γραμμές αναφοράς που προέκυψαν για τα διάφορα είδη πλοίων που μελετήθηκαν. [6]

Ship type	Ship size	Parameters		R ²	Population	Excluded***
		a	c			
Bulk Carrier	≥400 GT	961.79	0.477	0.9289	2512	16
Gas tanker	≥400 GT	1120.00	0.456	0.9446	354	0
Tanker	≥400 GT	1218.80	0.488	0.9574	3655	14
Container ship	≥400 GT	186.52	0.200	0.6191	2406	32
General cargo ship	≥400 GT	107.48	0.216	0.3344	2086	47
Refrigerated cargo carrier	≥400 GT	227.01	0.244	0.5130	61	1
Combination carrier	≥400 GT	1219.00	0.488	0.9575	6**	0

Πίνακας 1-5: Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των γραμμών αναφοράς.

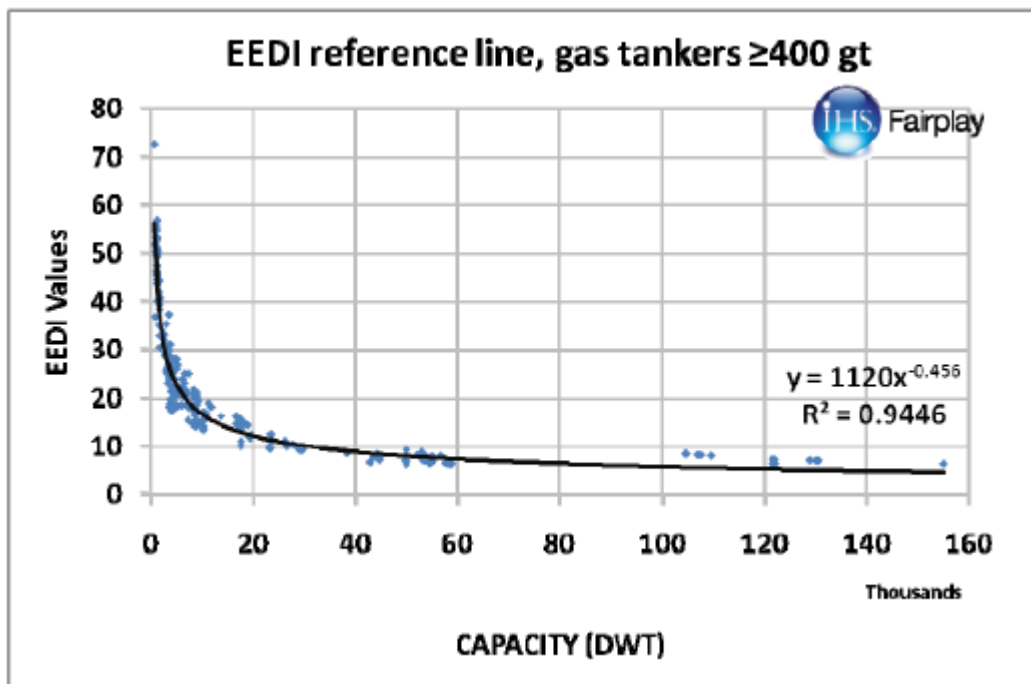
Οι γραμμές αναφοράς για κάθε είδος πλοίου όπως παρουσιάζονται στην [6] έχουν ως εξής:

1. Πλοία ξηρού φορτίου (Bulk carrier)



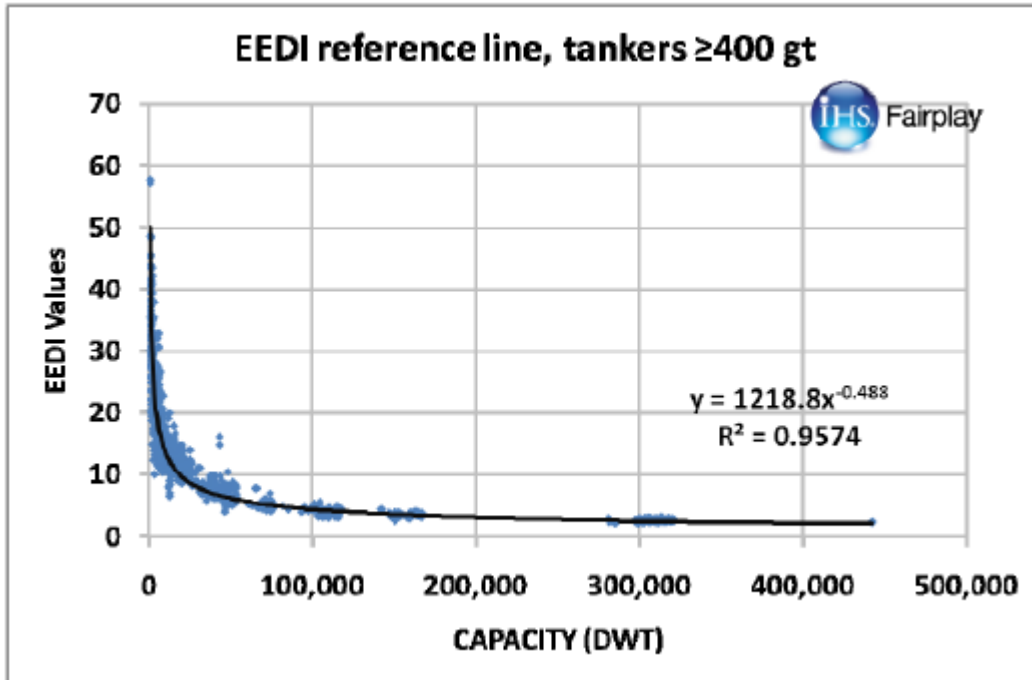
Διάγραμμα 1-3: Γραμμές αναφοράς πλοίων ξηρού φορτίου (Bulk carrier).

2. Gas Tankers



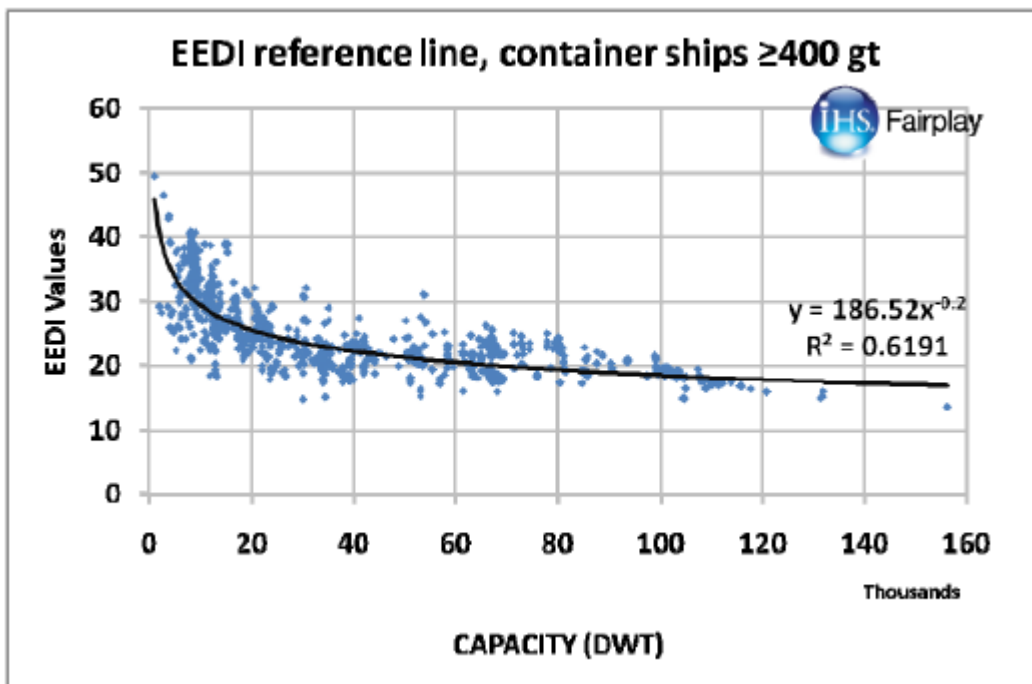
Διάγραμμα 1-4: Γραμμές αναφοράς πλοίων Gas Tankers .

3. Tankers



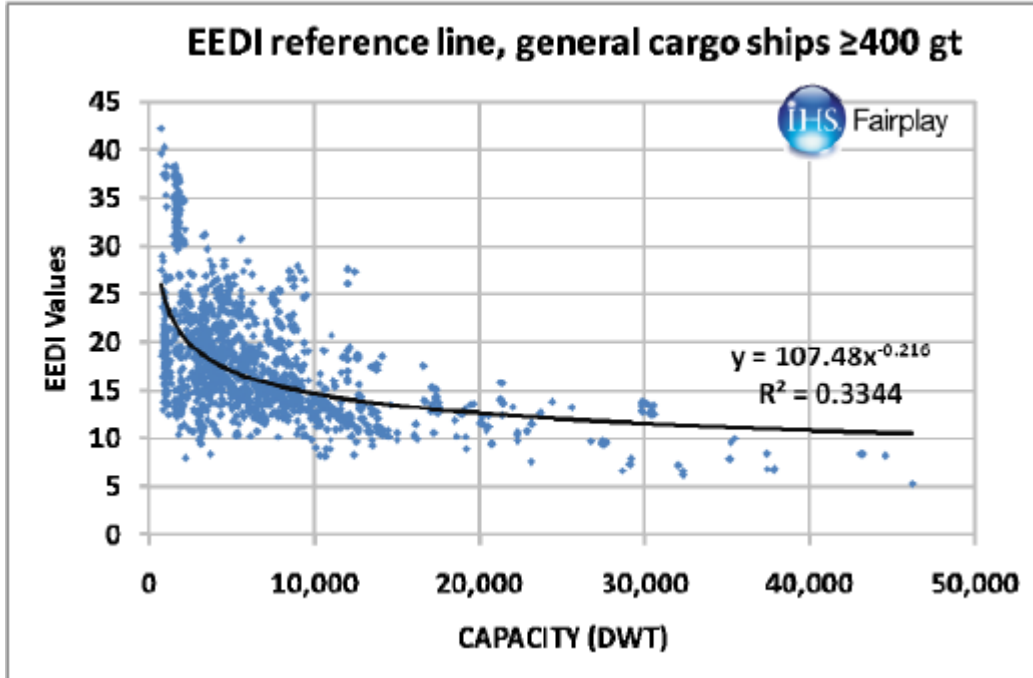
Διάγραμμα 1-5: Γραμμές αναφοράς πλοίων Tankers.

4. Container πλοία



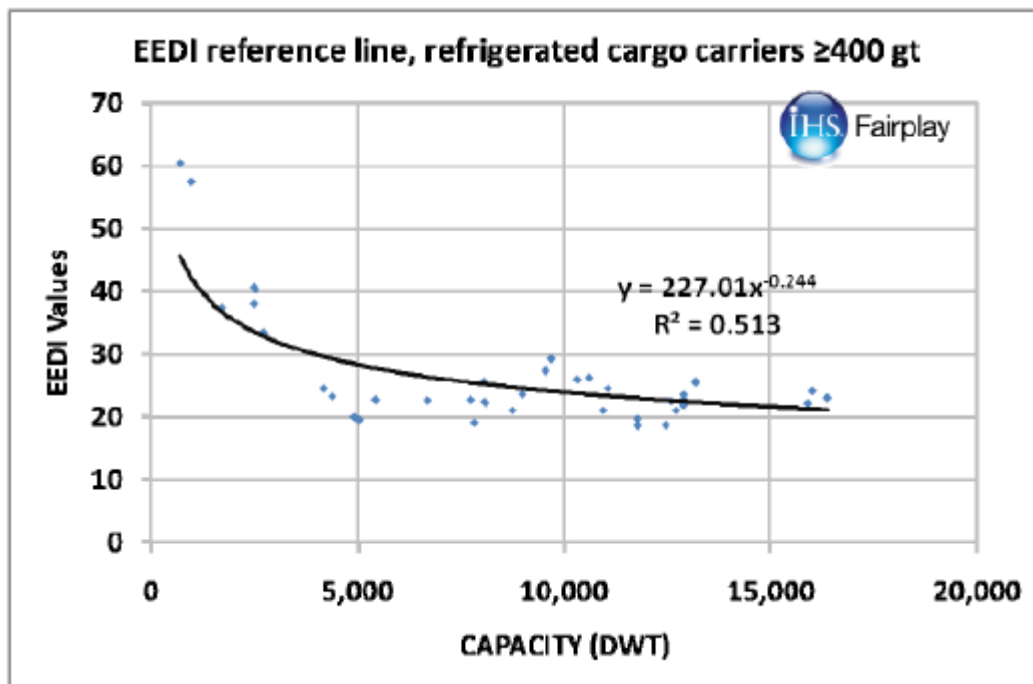
Διάγραμμα 1-6: Γραμμές αναφοράς πλοίων Containership.

5. Γενικού φορτίου πλοία



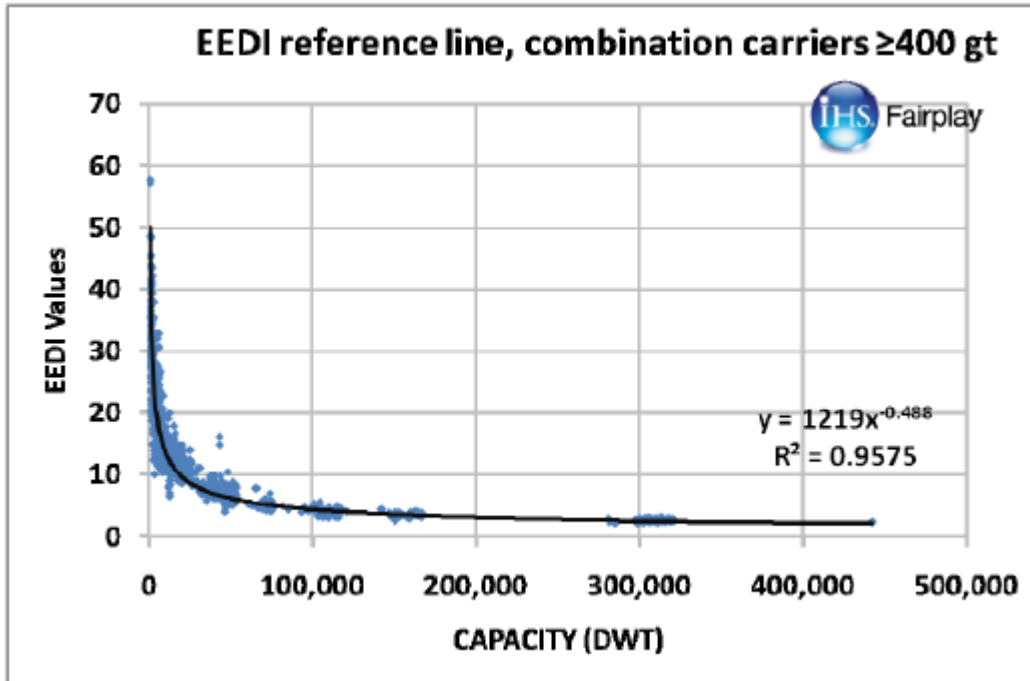
Διάγραμμα 1-7:Γραμμές αναφοράς πλοίων γενικού φορτίου.

6. Φορηγά πλοία-Ψυγεία



Διάγραμμα 1-8:Γραμμές αναφοράς φορητών πλοίων-ψυγείων.

7. Συνδυαστικά πλοία



Διάγραμμα 1-9:Γραμμές αναφοράς συνδυαστικών πλοίων.

1.5 Δείκτης EEOI

Εκτός από τον δείκτη EEDI, ο οποίος εκφράζει την αποδοτικότητα του σχεδιασμού ενός πλοίου, ο διεθνής οργανισμός IMO έχει αναπτύξει και τον δείκτη EEOI Energy Efficiency Operational Index. Ο EEOI είναι ένας δείκτης που αποτυπώνει την ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πλοίου για ένα ταξίδι. Εκφράζει δηλαδή το πραγματικό περιβαλλοντικό κόστος που έχει η λειτουργία του σε σχέση με το πραγματικό κοινωνικό όφελος της μεταφοράς αγαθών ή ανθρώπων. Πιο απλά μπορεί να εκφραστεί ως:

$$EEOI = \frac{\text{actual CO2 emissions}}{\text{performed transport work}}$$

Οι πραγματικές εκπομπές CO₂ αντιπροσωπεύουν τις ολικές εκπομπές CO₂ που προήλθαν από την καύση συγκεκριμένης ποσότητας καυσίμου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή μετατροπής των γραμμαρίων καυσίμου σε γραμμάρια CO₂. Ενώ το κοινωνικό όφελος είναι οι πραγματικοί τόνοι προϊόντων ή οι άνθρωποι που μεταφέρθηκαν σε αυτό το ταξίδι. Μετρείται σε τόνους εκπεμπόμενου CO₂ ανά τόνους μεταφερόμενου φορτίου (tonnes) ανά απόσταση (nautical mile) και η μαθηματική του έκφραση είναι η ακόλουθη:

$$EEOI = \frac{\sum J FC_J * C_{Fj}}{m_c * D} \quad (1.13)$$

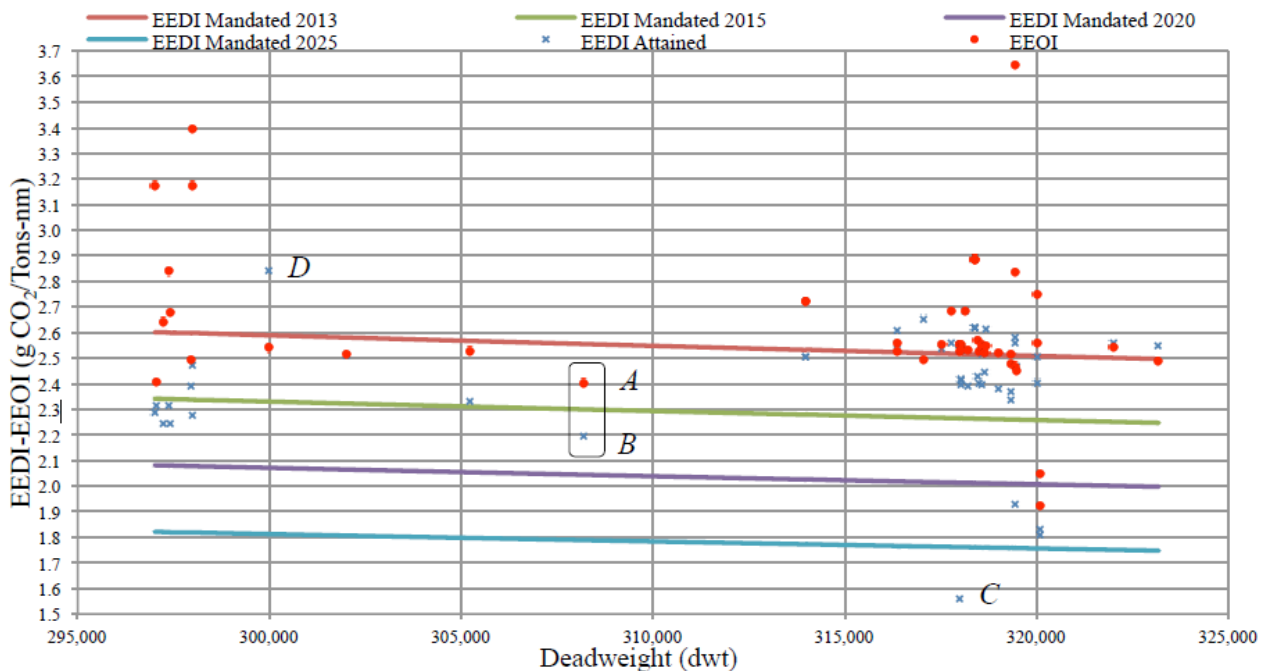
Ενώ σε περίπτωση που ζητείται η ένας μέσος όρος της απόδοσης για έναν αριθμό ταξιδιών τότε η εξίσωση αλλάζει και γίνεται:

$$Average\ EEOI = \frac{\sum_i \sum_j FC_{ij} * C_{Fj}}{\sum_i m_c * D} \quad (1.14)$$

Η κύρια διαφορά με τον EEDI δείκτη είναι ότι πλέον αποτυπώνεται με πραγματικούς αριθμούς κατανάλωσης το πόσο αποδοτικό είναι ένα πλοίο και όχι με τις θεωρητικές τιμές καταναλώσεων της Κύριας Μηχανής και των Ηλεκτρογεννητριών. Η επίδραση των καιρικών συνθηκών αποτυπώνεται πλέον πραγματικά στην κατανάλωση και όχι με συντελεστές διόρθωσης. Αυτές οι διαφορές είναι ικανές να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των δύο δεικτών.

Αυτό το γεγονός γίνεται εμφανές στην [4] στην οποία συγκρίνονται οι τιμές των δεικτών EEDI και EEOI για VLCC Tankers. Στο Διάγραμμα 1-10 φαίνονται με μπλε τελείες οι τιμές του EEDI και με κόκκινες οι αντίστοιχες τιμές του EEOI για 49 πλοία κατασκευασμένα το 2012. Για κάθε πλοίο οι δύο τελείες βρίσκονται στην ίδια κάθετη (A και B είναι τιμές του ίδιου πλοίου). Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό ελάχιστα είναι αυτά που η τιμή του EEOI είναι μικρότερη του EEDI. Συγκεκριμένα μόνο το 16% για την περίοδο 2012-2015 ενώ από το 2015 και μετά που αλλάζει η γραμμή αναφοράς για τον EEDI, κανένα από τα πλοία δεν θα έχει δείκτη EEOI μικρότερο από τον αντίστοιχο EEDI.

Είναι δηλαδή αποδεκτό πως ο δείκτης EEOI αποδίδει καλύτερα την ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου.



Διάγραμμα 1-10: Σύγκριση δεικτών EEDI-EEOI για VLCC Tankers.

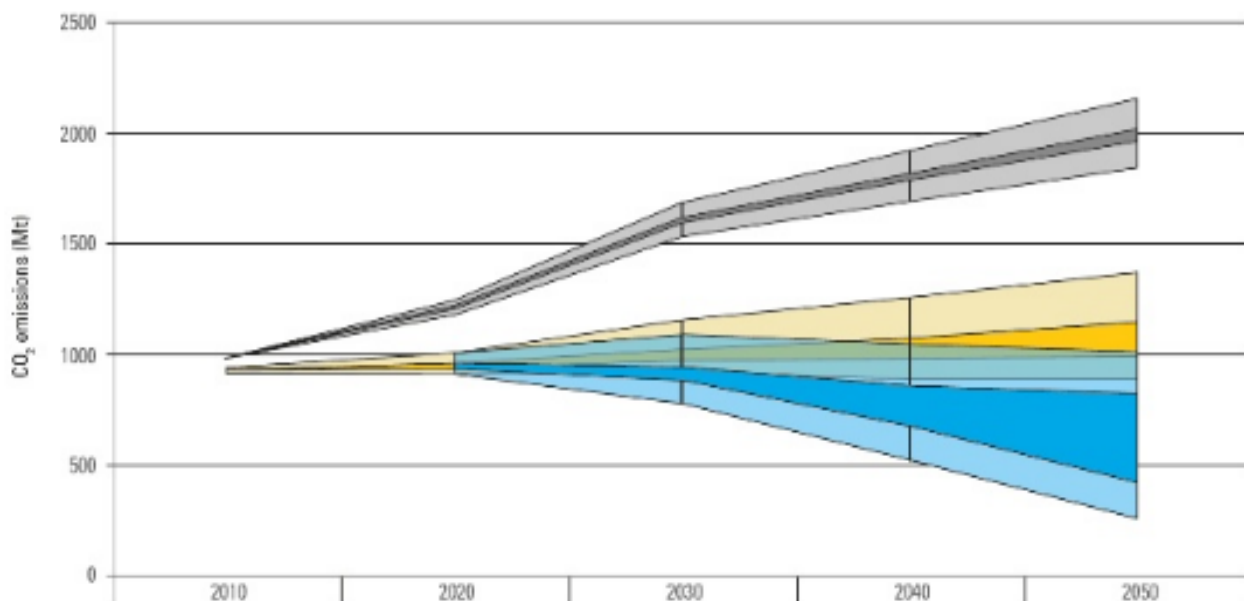
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΙΚΑ ΜΕΤΡΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΟΥ EEDI

2.1 Εισαγωγή

Αφού εξηγήθηκε προηγουμένως ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται και υπολογίζεται ο EEDI, στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρηθεί να παρουσιαστούν και να αναλυθούν τρόποι μέσω των οποίων είναι δυνατή η βελτίωση της τιμής του δείκτη. Βελτίωση της τιμής του δείκτη σημαίνει πρακτικά πιο αποδοτική μεταφορά προϊόντων με μικρότερη κατανάλωση και άρα περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων και προστασία του περιβάλλοντος.

Οι ρύποι προερχόμενοι από την ναυτιλία, αν και σήμερα αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό των συνολικά εκπεμπόμενων ρύπων (το 2013 υπολογίστηκε στο 3% της παγκόσμιας εκπομπής) παρουσιάζουν τάση για μεγάλη αύξηση στην ποσότητα τους τα επόμενα χρόνια: από 50% αύξηση ως το 2030 σύμφωνα με μελέτη του DNV, μέχρι και να φτάσουν το 10% επί του συνόλου ως το 2050, αν δεν παρθούν μέτρα. Ταυτόχρονα, στην ίδια μελέτη σημειώνεται πως αν ληφθούν λειτουργικά και τεχνικά μέτρα, σε συνδυασμό με τη χρήση βιοκαυσίμων και LNG, υπάρχει δυνατότητα μείωσης των εκπομπών αυτών στο μισό! Παρόλα αυτά, ακόμα κι αν συμβεί αυτό το 2050, η συνολική συμβολή τους θα είναι διπλάσια σε σχέση με σήμερα, μιας και οι άλλοι τομείς θα βελτιώνουν τις επιδόσεις τους. Στο Διάγραμμα 2-1 παρουσιάζονται γραφικά αυτές οι προοπτικές. [7]Με γκρι, σημειώνεται η προοπτική αν δεν ληφθούν κάποια μέτρα, με κίτρινο χρώμα αν συνδυαστούν η χρήση βιοκαυσίμων και LNG με την εφαρμογή τεχνικών μέτρων και βελτιώσεων, ενώ με μπλε αν συμπεριληφθεί στα προηγούμενα και η χρήση πυρηνικής ενέργειας.



Διάγραμμα 2-1: Ποσότητα ρύπων προερχόμενοι από την ναυτιλία και προοπτικές εξέλιξής τους.

Στην εργασία αυτή θα αναφερθούμε στην εφαρμογή λειτουργικών αλλά κυρίως τεχνικών μέτρων καθώς και στην επίδρασή τους στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Κύριος στόχος είναι να αναδείξουμε τη συμβολή καθενός από αυτά, η συνδυασμών τους, στην εξοικονόμηση καυσίμων αλλά και κατά πόσο η εφαρμογή τους σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές είναι επενδυτικά συμφέρουσα ώστε να πραγματοποιηθεί.

Κατά καιρούς σε διάφορες μελέτες έχουν αρκετά μέτρα. Επιγραμματικά θα αναφέρουμε τα παρακάτω:

Λειτουργικά μέτρα

Είναι μέτρα που μπορούν να παρθούν χωρίς να απαιτείται μετατροπή του μηχανολογικού εξοπλισμού που βρίσκεται πάνω στο πλοίο. Έχουν να κάνουν κυρίως με τη διαχείριση αυτού του εξοπλισμού και τον τρόπο λειτουργίας του. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι για την εφαρμογή τους δεν χρειάζονται κεφάλαια. Τέτοια είναι:

- Μικρότερη ταχύτητα πλεύσης.
- Προσαρμογή της ταχύτητας ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες.
- Βελτιστοποίηση του ταξιδιού σε συνθήκες θαλάσσιου έρματος (ballast water).
- Συντήρηση-καθαρισμός προπέλας και γάστρας.
- Ευαισθητοποίηση του προσωπικού σε θέματα κατανάλωσης ενέργειας.

Τεχνικά μέτρα

Είναι μέτρα τα οποία απαιτούν μετατροπές, βελτιώσεις, πιθανόν προσθήκες και αλλαγές στο μηχανολογικό εξοπλισμό και συνήθως είναι και αρκετά δαπανηρά. Τέτοια είναι:

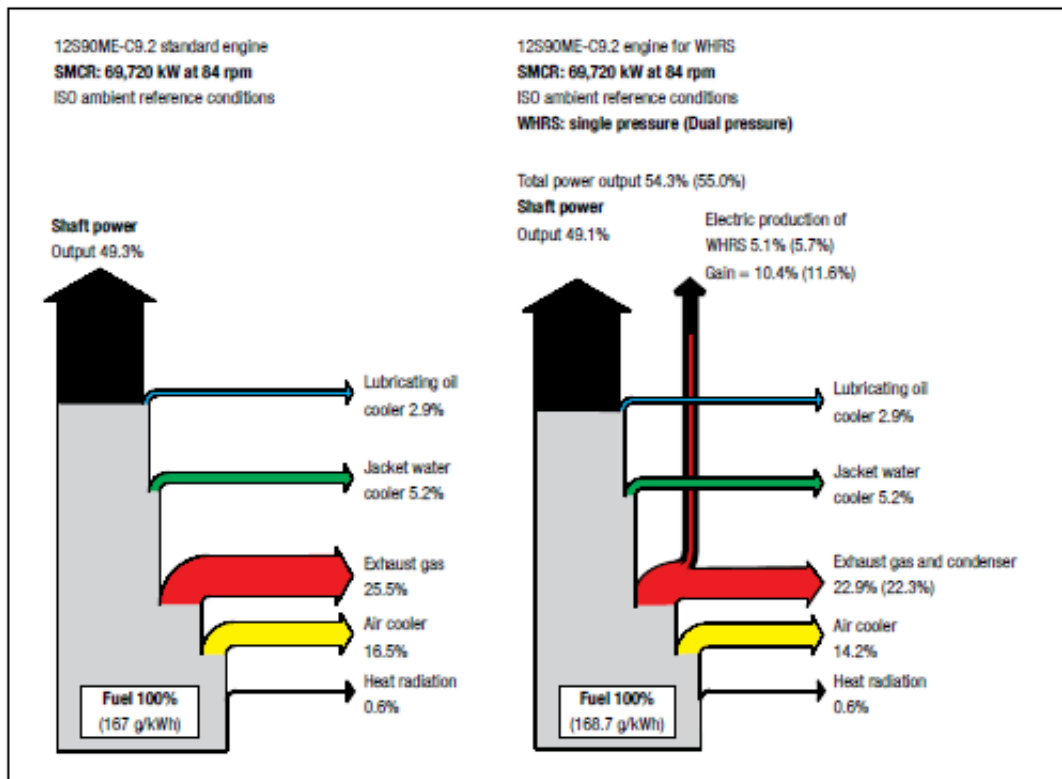
- Σύστημα ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια.
- Χρήση αντλιών και ανεμιστήρων μεταβλητών στροφών.
- Βελτιστοποίηση του συστήματος κλιματισμού με χρήση Variable Frequency Drive σε αντλίες, συμπιεστές και ανεμιστήρες.
- Βελτιστοποίηση Κύριας Μηχανής για μικρότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC).
- Βελτιστοποίηση συνεργασίας πλοίου-προπέλας.
- Χρήση συστήματος air lubrication στη γάστρα για μειωμένες τριβές.

Τα παραπάνω θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.2 Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας από τα καυσαέρια (Waste Heat Recovery System)

Η θερμότητα που προέρχεται από τα καυσαέρια της Κύριας Μηχανής είναι μακράν η πιο ελκυστική επιλογή ανάμεσα στις πηγές θερμότητας που μπορεί να υπάρξουν σε ένα πλοίο. Ο λόγος είναι η μεγάλη ποσότητα καυσαερίων και η υψηλή τους θερμοκρασία. Παρόλο που η τεχνολογία έχει εξελιχθεί και πλέον οι σημερινές μηχανές πετυχαίνουν μια απόδοση έως και 50%, ένα 25% της ενέργειας καυσίμου χάνεται στα καυσαέρια. Με ένα Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας από τα καυσαέρια της Κύριας Μηχανής, ανάλογα και με τον τύπο της μηχανής, θα μπορούσε να εξαχθεί ενέργεια είτε για τις θερμικές ανάγκες του πλοίου είτε για ηλεκτρισμό. Περίπου το 11% της αποδιδόμενης ισχύος της μηχανής θα μπορούσε να κερδηθεί σε επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που θα καλύψει μέρος ή και ολόκληρες τις ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρισμό. Κάτι τέτοιο δίνει δυνατότητες μείωσης κατά πολύ του λειτουργικού κόστους του πλοίου, των εκπεμπόμενων ρύπων και συνεπώς του δείκτη EEDI.

Το αποτέλεσμα της εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος θα βελτιώσει αρκετά την απόδοση όσον αφορά στην εκμετάλλευση της ενέργειας του καυσίμου, θα μειώσει όμως ταυτοχρόνως, έστω και κατά λίγο, την απόδοση της Κύριας Μηχανής στην παραγωγή μηχανικής ισχύος. Στην Εικόνα 2-1 παρουσιάζεται αυτό ακριβώς. [7]



Εικόνα 2-1: Αποδιδόμενη ενέργεια Κύριας Μηχανής με ή χωρίς Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας οι οποίοι μπορούν να επιλεγούν κατά περίπτωση. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από το τι ανάγκες σε ηλεκτρισμό πρέπει να καλυφθούν, το προφίλ λειτουργίας του πλοίου, την επιθυμητή διάρκεια απόσβεσης της επένδυσης αλλά και από τον διαθέσιμο χώρο που υπάρχει ώστε να εφαρμοσθεί ένα τέτοιο σύστημα. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει η σωστή επιλογή της Κύριας Μηχανής σε ισχύ και στροφές και η προπέλα ώστε να διασφαλιστεί η μικρότερη κατανάλωση καυσίμου. Οι τρεις διαφορετικοί τύποι είναι:

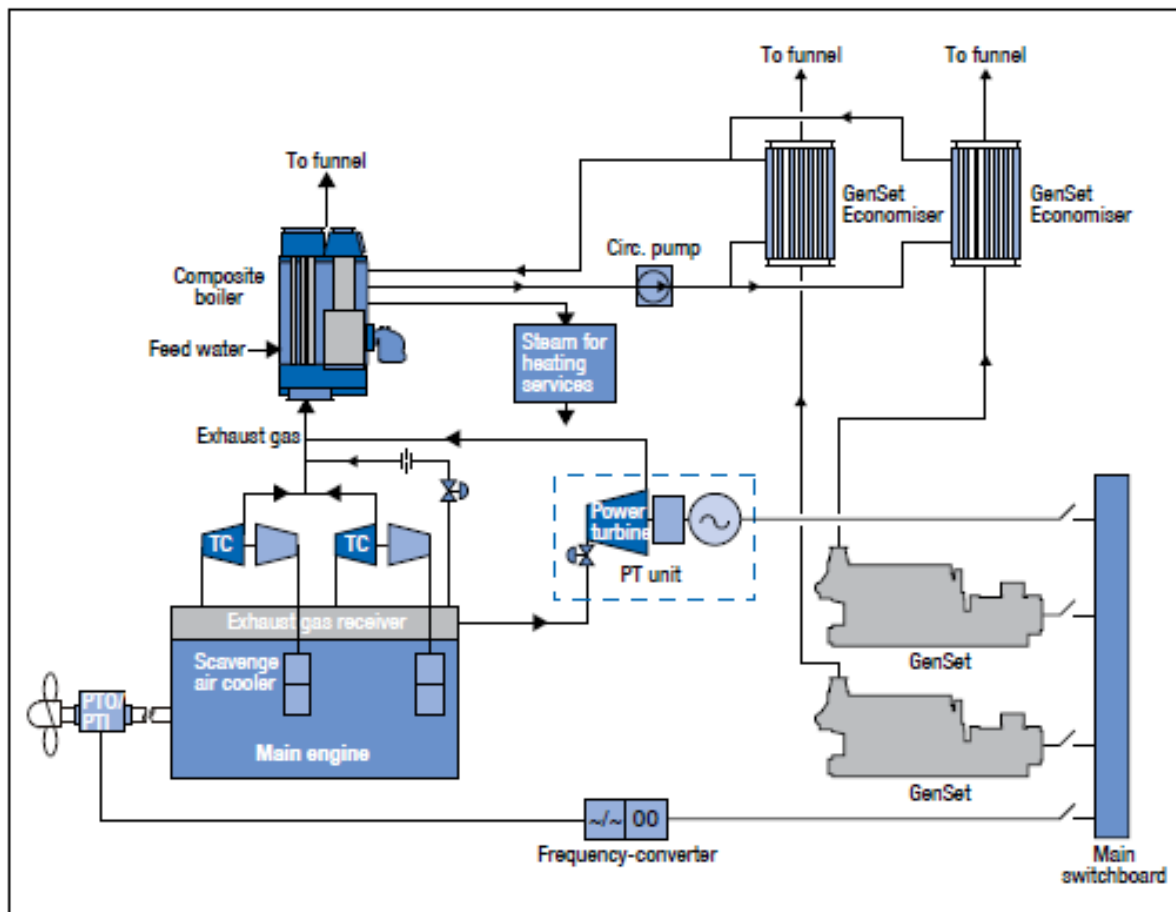
- PTG-Power Turbine Generator unit. Αποτελείται από έναν αεριοστρόβιλο, ένα κιβώτιο ταχυτήτων και μια ηλεκτρική γεννήτρια.
- STG-Steam Turbine Generator unit. Αποτελείται από έναν ατμοστρόβιλο, ένα κιβώτιο ταχυτήτων και μια ηλεκτρική γεννήτρια. Μπορεί να είναι ενός ή δύο επιπέδων πίεσης ατμού
- ST-PT-Steam Turbine-Power Turbine unit. Είναι ο συνδυασμός των δύο παραπάνω συστημάτων. Υπάρχει και ο ατμοστρόβιλος και ο αεριοστρόβιλος, το κιβώτιο και η ηλεκτρική γεννήτρια. Επίσης μπορεί να είναι είτε μονού είτε διπλού επιπέδου πίεσης ατμού.

Βασικό κοινό χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων είναι ότι ένα μέρος των καυσαερίων παρακάμπτεται (bypass) και δεν οδηγείται στα Turbocharger. Σαν αποτέλεσμα είναι η συνολική ποσότητα εισαγόμενου αέρα και εξαγόμενων καυσαερίων να είναι μειωμένη. Η μείωση οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων μετά τα Turbocharger. Αυτό σημαίνει αύξηση στην μέγιστη δυνατότητα παραγωγής ατμού στο Exhaust Gas Boiler, ο οποίος ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Τα καυσαέρια που παρακάμπτονται μπορούν να οδηγηθούν σε έναν αεριοστρόβιλο (power turbine) και μέσω της αποτόνωσης τους να προσφέρουν ενέργεια. Στη συνέχεια θα επεξηγηθούν τα χαρακτηριστικά καθενός από τα παραπάνω συστήματα που αναφέρθηκαν. [7]

2.2.1 PTG-Power Turbine Generator unit

Όπως εξηγήθηκε και νωρίτερα, το PTG αποτελείται από έναν αεριοστρόβιλο, ένα κιβώτιο ταχυτήτων και μια ηλεκτρική γεννήτρια η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του αεριοστρόβιλου σε ηλεκτρική. Είναι το πιο απλό και φθηνότερο σύστημα από τα τρία καθώς απαιτούνται μικρές τροποποιήσεις για την σύνδεσή του με την Κύρια Μηχανή.

Στο σύστημα αυτό το Σύστημα Εξαγωγής της Μηχανής είναι εφοδιασμένο με δύο συνδέσεις, μια το bypass και μια προς τον αεριοστρόβιλο. Συνήθως η σύνδεση για τον αεριοστρόβιλο είναι και μεγαλύτερη μιας και τοποθετείται και αρκετά μέτρα μακριά από τη Μηχανή στο μηχανοστάσιο. Μαζί στο σημείο εκείνο τοποθετείται και η γεννήτρια. Ενδεικτικά ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-2. [7]



Εικόνα 2-2: Σύστημα PTG-Power Turbine Generator

Τα καυσαέρια που παρακάμπτον τα Turbochargers οδηγούνται προς τον αεριοστρόβιλο όπου και αποδίδουν την ενέργεια τους κινώντας έναν άξονα. Πάνω στον άξονα αυτόν είναι συνδεδεμένη η γεννήτρια, η οποία και παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Αφού αποτονωθούν, τα καυσαέρια ενώνονται με αυτά που εξέρχονται από τα Turbocharger και οδηγούνται προς το Exhaust Gas Boiler. Ένα τέτοιο σύστημα PTG μπορεί να είναι και αυτόνομο ή να συνδεθεί παράλληλα με το υπάρχον σύστημα ηλεκτρογεννητριών. Αυτή η λύση μπορεί να αυξήσει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε ένα ποσοστό 3-5% της ισχύος της Κύριας Μηχανής.

2.2.2 STG-Steam Turbine Generator unit

Ένα τέτοιο σύστημα μονής πίεσης για παραγωγή κορεσμένου και υπέρθερμου ατμού παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί. Το Exhaust Gas Boiler είναι τριών σταδίων: economizer, evaporator και superheater. Το νερό αντλείται από τη δεξαμενή μέσω των Feed Water αντλιών και οδηγείται στο τύμπανο (steam drum). Στο σύστημα που παρουσιάζεται εδώ υπάρχει και ένας εναλλάκτης για να ζεσταίνει το νερό. Η θερμοκρασία του νερού από τη δεξαμενή κυμαίνεται από 50 έως 120°C, ενώ εξερχόμενο από τον εναλλάκτη έχει θερμοκρασία ελαφρώς μικρότερη από το σημείο κορεσμού του νερού (165 °C στα 7bar). Το θερμαίνον μέσον είναι το κορεσμένο νερό του τυμπάνου, που αντλείται από τη Circulating pump και μετά οδηγείται στο economizer για αναθέρμανση. Για να διατηρηθεί η

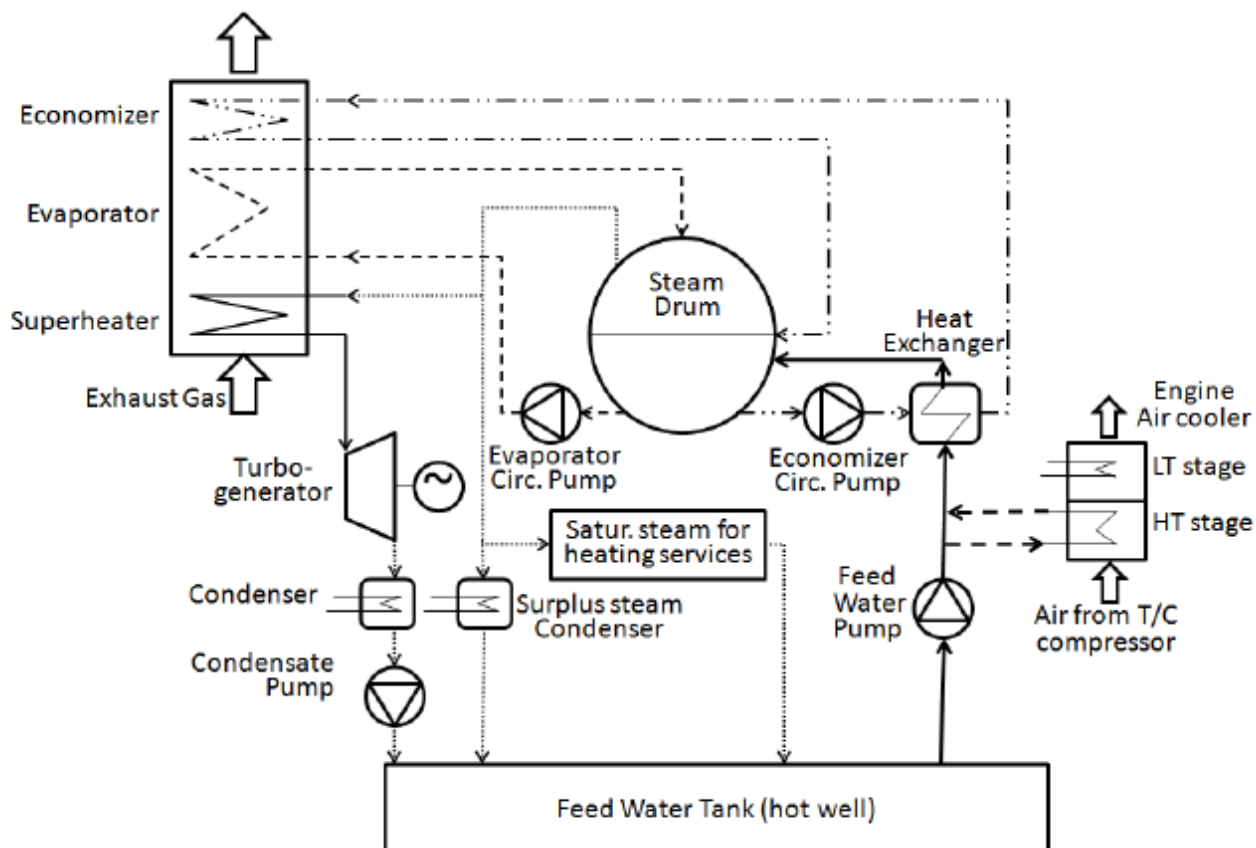
θερμοκρασία αυτού του νερού στην έξοδο του εναλλάκτη κοντά στους 130°C, πρέπει η παροχή του να είναι 3-4 φορές μεγαλύτερη από την παροχή του θερμαινόμενου μέσου. Εξερχόμενο από το economizer επιστρέφει στο τύμπανο έχοντας θερμοκρασία σχεδόν ίση με τη θερμοκρασία κορεσμού του νερού στις συνθήκες πίεσης που λειτουργεί το τύμπανο.

Μια επιπλέον αντλία κυκλοφορεί νερό στο evaporator του boiler. Η παροχή της αντλίας αυτής πρέπει να είναι 2-4 φορές μεγαλύτερη από την παροχή των Feed Water αντλιών ώστε να μην διακινδυνεύσει το evaporator να μείνει χωρίς νερό και υπερθερμανθεί. Στο evaporator ένα ποσοστό κορεσμένου νερού μετατρέπεται σε κορεσμένο ατμό. Αυτό το μείγμα ατμού-νερού οδηγείται στο τύμπανο, όπου ο κορεσμένος ατμός παραμένει στο πάνω μέρος. Πιθανόν ένα μέρος αυτού του ατμού να χρησιμοποιείται ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του πλοίου σε ατμό. Το υπόλοιπο οδηγείται στο superheater.

Η θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού εξαρτάται από τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Η διαφορά στις θερμοκρασίες εξόδου από το superheater, του εξερχόμενου ατμού και καυσαερίων απαιτείται να είναι γύρω στους 15 °C. Ο εξερχόμενος ατμός, οδηγείται στον αμοστρόβιλο όπου και εκτονώνεται παράγοντας μηχανικό έργο το οποίο κινεί την ηλεκτρογεννήτρια. Έτσι παράγεται ηλεκτρισμός ο οποίος μπορεί να καλύψει μέρος ή όλες τις ανάγκες του πλοίου ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες. Ο ατμός πρέπει να είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε νερό, το πολύ 10% , ειδάλλως η παρουσία σταγονιδίων νερού μπορεί να προκαλέσει φθορά στις λεπίδες του στροβίλου. Στη συνέχεια, ο ατμός που εξέρχεται του στροβίλου, οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου και συμπυκνώνεται με τη βοήθεια θαλασσινού νερού, σε μια πίεση της τάξεως των 50-80mbar ώστε η αναλογία εκτόνωσης να είναι μέγιστη και να παράγεται το μέγιστο μηχανικό έργο. Το συμπύκνωμα καταλήγει στη δεξαμενή.

Τέλος, όπως φαίνεται και στην εικόνα, υπάρχει δυνατότητα να θερμαίνεται το νερό που προέρχεται από τη δεξαμενή χρησιμοποιώντας τον αέρα από το Air Cooler της Μηχανής. Κάτι τέτοιο όμως απαιτεί επιπλέον αντλίες και σωληνώσεις. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται λιγότερη θερμότητα από το economizer, με αποτέλεσμα αυτή η θερμότητα να είναι διαθέσιμη στα άλλα δύο στάδια του boiler. Όμως για να εξασφαλισθεί η σωστή λειτουργία του συστήματος, χρειάζεται η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων να αυξηθεί ώστε να μη μειωθεί πολύ η θερμοκρασιακή διαφορά στο pinch point. [8]

Συγκριτικά με το προηγούμενο σύστημα, αυτό είναι αρκετά περίπλοκο μιας και αρκετός εξοπλισμός χρειάζεται τροποποιήσεις. Πολύ πιθανό, το ίδιο το Exhaust Gas Boiler να χρειαστεί να γίνει μεγαλύτερο. Σωληνώσεις πρέπει να εγκατασταθούν για τη σύνδεσή του με τον αμοστρόβιλο. Επίσης, απαιτείται η εγκατάσταση ενός συμπυκνωτή, ο οποίος συνήθως τοποθετείται κάτω από το πλατώ του συστήματος αμοστρόβιλου-ηλεκτρογεννήτριες. Τέλος, σωληνώσεις πρέπει να εγκατασταθούν από τον συμπυκνωτή έως τη δεξαμενή Feed Water. Είναι φανερό πως μια τέτοια λύση απαιτεί αρκετό χώρο στο Μηχανοστάσιο, προσφέρει όμως ανάκτηση ενέργειας της τάξεως 5-8% της Κύριας Μηχανής. [7]



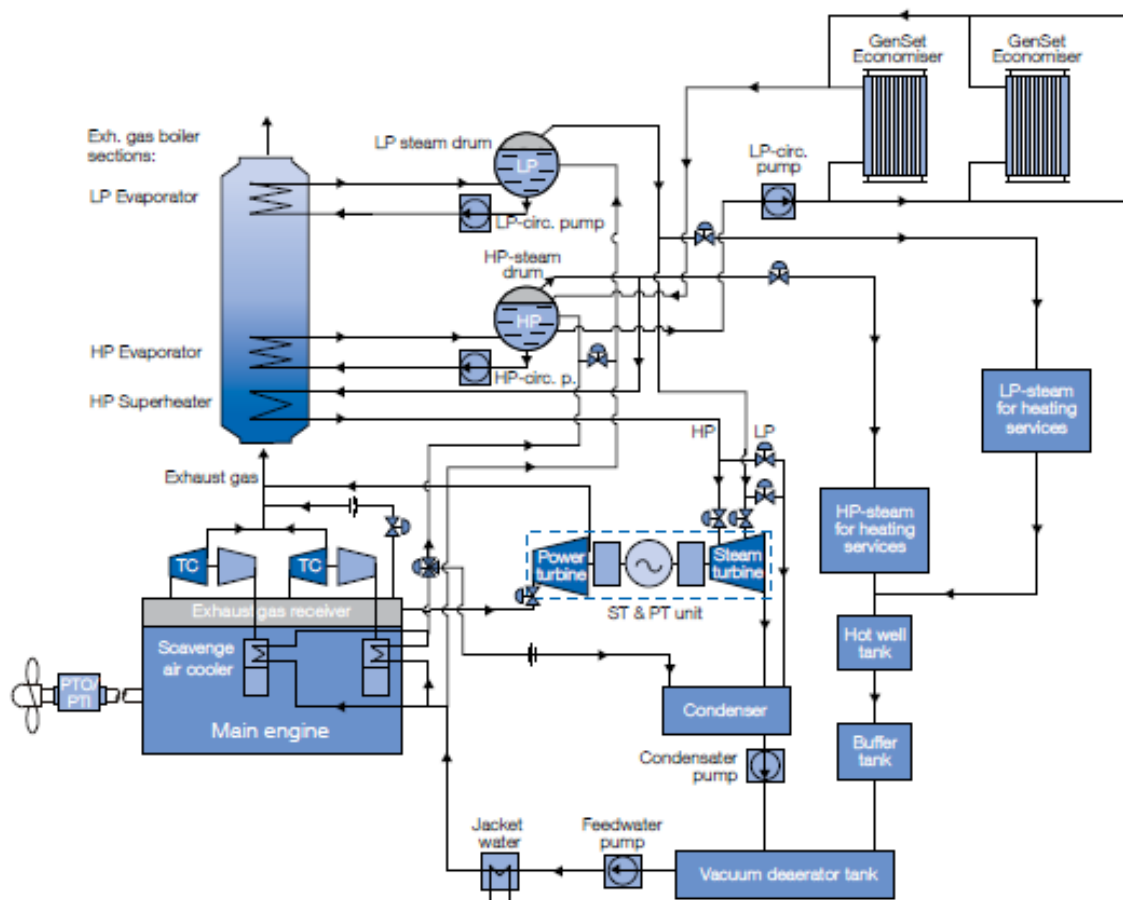
Εικόνα 2-3: Σύστημα STG Steam Turbine Generator

2.2.3 ST-PT- Steam Turbine-Power Turbine unit

Σε περίπτωση που οι ανάγκες για ηλεκτρισμό σ' ένα πλοίο είναι αυξημένες, π.χ σε ένα containership, τότε χρησιμοποιείται ένα Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας που συνδυάζει τα δύο προαναφερθέντα. Υπάρχει δηλαδή ένας αεριοστρόβιλος και ένας ατμοστρόβιλος οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι μέσω κιβωτίων ταχυτήτων σε κοινό άξονα με την ηλεκτρογεννήτρια.

Η ισχύς από τον αεριοστρόβιλο προστίθεται στην ισχύ της γεννήτριας μέσω μειωτήρα στροφών. Πάντως, είναι ο ατμοστρόβιλος εκείνος που ξεκινάει να παράγει, περίπου στο 30-35% στο MCR της Κύριας Μηχανής ενώ ακολουθεί ο αεριοστρόβιλος, όταν η ισχύς της φτάσει στο 45-50% του MCR.

Αυτό το συνδυαστικό Σύστημα, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα, είναι διπλής πίεσως ατμού. Φαίνονται τα δύο τύμπανα, υψηλής και χαμηλής πίεσης, από τα οποία οδηγούνται δύο ρεύματα ατμού, υψηλής και χαμηλής πίεσης αντίστοιχα, στον ατμοστρόβιλο. Μπορεί να πετύχει ανάκτηση ενέργειας της τάξεως του 8-11%, αναλόγως και την ισχύ της Κύριας Μηχανής, κάτι που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετό να καλύπτει ακόμα και το σύνολο των αναγκών σε ηλεκτρισμό, οδηγώντας σε μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμου. [7]



Εικόνα 2-4: Σύστημα ST-PT Steam Turbine-Power Turbine

Όπως γίνεται εύκολο αντιληπτό, αυτό το Σύστημα παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα στην εφαρμογή του και μια σειρά πολλών παραγόντων πρέπει να ληφθεί υπόψη. Ο παράγοντας που αποτελεί πραγματική πρόκληση είναι το γεγονός ότι ο αεριοστρόβιλος πρέπει να συνδεθεί με το Exhaust Gas σύστημα της Κύριας Μηχανής ενώ ο ατμοστρόβιλος πρέπει να συνδεθεί με το Boiler το οποίο μπορεί να βρίσκεται αρκετά μακριά. Επίσης ειδικά για ένα σύστημα διπλής πίεσης όπως αυτό που αναφέρθηκε, θα πρέπει το Boiler να περιλαμβάνει: Economizer υψηλής και χαμηλής πίεσης, τύμπανο υψηλής και χαμηλής πίεσης, superheater, αντλίες κλπ. Όλος αυτός ο εξοπλισμός απαιτεί αρκετό χώρο.

2.3 Αντλίες και Ανεμιστήρες Μεταβλητών Στροφών

Μέχρι πρόσφατα, δεν είχε δοθεί μεγάλη έμφαση στην ενεργειακή αποδοτικότητα των βοηθητικών συστημάτων που τοποθετούνταν στα πλοία. Τα ναυπηγεία, μόνο αν το απαιτούσε ο πλοιοκτήτης, εγκαθιστούσαν τεχνολογίες ενεργειακά αποδοτικές στα βοηθητικά συστήματα στα υπό κατασκευή πλοία κι έτσι πολλά από τα συστήματα αυτά δεν ήταν βελτιστοποιημένα ως προς την κατανάλωσή

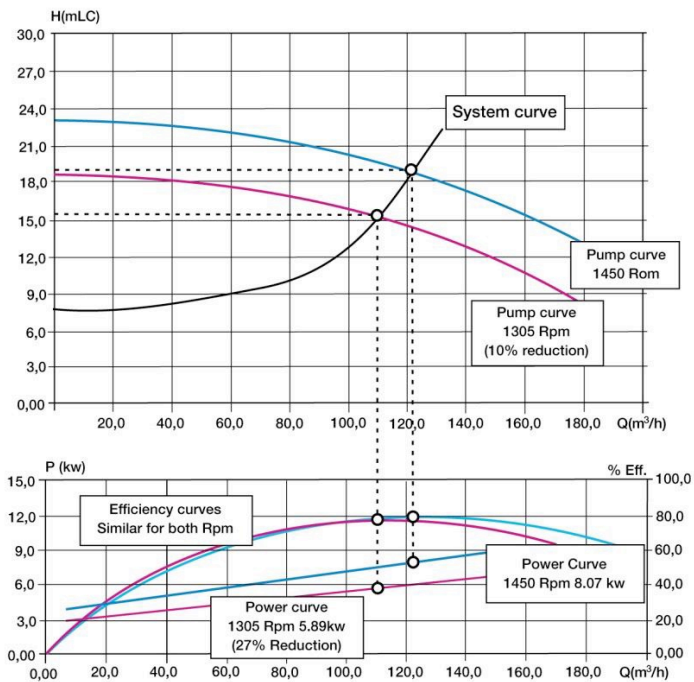
τους. Τέτοια συστήματα, που έχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης της απόδοσής τους, είναι τα συστήματα που χρησιμοποιούν μεγάλες αντλίες και ανεμιστήρες.

Τέτοια είναι οι αντλίες του συστήματος ψύξης με νερό θαλάσσης (cooling sea water pumps), οι αντλίες τροφοδοσίας του καζανιού (feed water pumps), των συστημάτων κλιματισμού, πυρόσβεσης καθώς και άλλων πολλών συστημάτων (bilge water, lub oil pumps κ.α). Οι αντλίες αυτές είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν με την Κύρια Μηχανή σε πλήρη λειτουργία στο 100% του MCR, σε δυσμενείς συνθήκες και περιβάλλοντα (π.χ υψηλή θερμοκρασία νερού θαλάσσης), γι' αυτό και υπερδιαστασιολογούνται. Είναι λογικό και απλό καθώς κριτήριο είναι να λειτουργούν με επιτυχία ακόμα και στις χειρότερες συνθήκες. Όμως αυτό δεν είναι απαραίτητο σε όλο το χρόνο λειτουργίας τους. Με αυτόν τον τρόπο όμως, οι αντλίες λειτουργούν συνέχεια στο 100%, όταν το φορτίο τους είναι κατά μέσο όρο περίπου στο 40%.

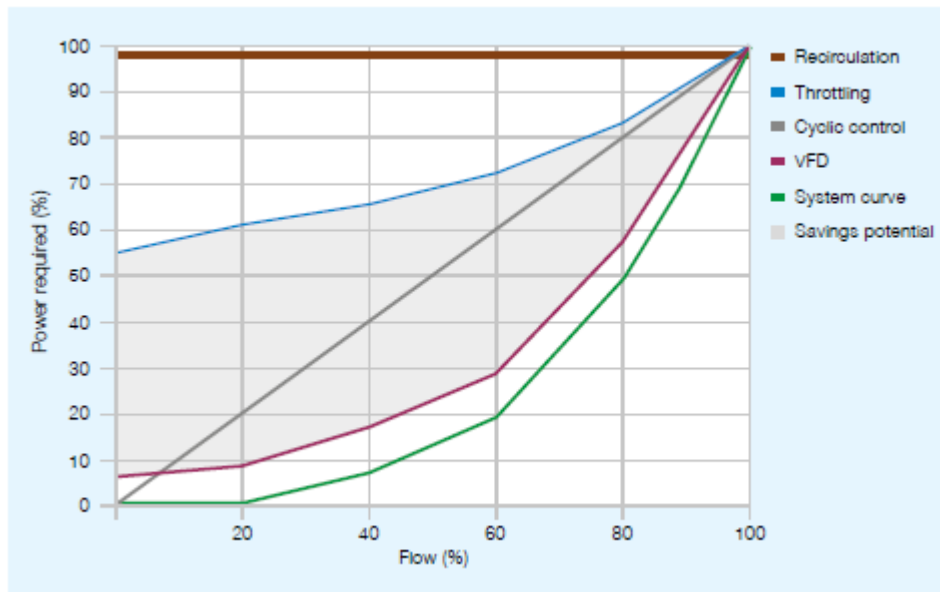
Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι ελέγχου της λειτουργίας των αντλιών, είναι ο έλεγχος ισχύος και ο βρόγχος ελέγχου της θερμοκρασίας. Όμως αυτοί οι τρόποι είναι ενεργειακά μη αποδοτικοί. Αντιθέτως, θα μπορούσε το σημείο λειτουργίας των κινητήρων να είναι ελεγχόμενο από σύστημα Variable Frequency Drive, είτε αυτόνομο είτε σε συνδυασμό με σύστημα κλειστού βρόγχου με αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας ώστε οι κινητήρες να λειτουργούν σε χαμηλότερες στροφές, τόσες όσες απαιτούνται από το στιγμιαίο φορτίο. Αυτός είναι ο πιο επιτυχημένος τρόπος για οικονομική λειτουργία και αυξημένη απόδοση. Χαρακτηριστικό είναι ότι στις αντλίες, μια μείωση της τάξεως του 10% στις στροφές του κινητήρα, επιφέρει μείωση 27% στην ηλεκτρική κατανάλωση, καθώς οι στροφές είναι ανάλογες με τον κύβο της ισχύος. Η σχέση δηλαδή που συνδέει την ηλεκτρική ισχύ κατανάλωσης με τις στροφές λειτουργίας είναι η:

$$\frac{P1}{P2} = \left(\frac{n1}{n2}\right)^3 \quad (2.1)$$

Η διαφορά στην κατανάλωση έπειτα από μείωση 10% στις στροφές λειτουργίας φαίνεται στο Διάγραμμα 2- 2 που ακολουθεί. Στο Διάγραμμα 2- 3 που έπεται, φαίνονται οι διαφορές στην απόδοση καθενός από τους τρόπους ελέγχου. [9] [10]



Διάγραμμα 2-2: Επίδραση μείωσης στροφών στην ηλεκτρική κατανάλωση



Διάγραμμα 2-3: Απόδοση διαφορετικών τρόπων ελέγχου στροφών αντλιών.

Στις [11] [12] αναφέρεται ότι με την εφαρμογή του συστήματος VFD στις Cooling Sea Water Pumps, όταν η Κύρια Μηχανή λειτουργεί στο 100% του MCR, τότε οι αντλίες του συστήματος ψύξης λειτουργούν στο 95% της ισχύος τους για να μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις ψύξης. Στην περίπτωση που η Κύρια Μηχανή λειτουργεί στο 85% του MCR, κάτι που είναι και το ονομαστικό σημείο λειτουργίας, τότε οι απαιτήσεις καλύπτονται με τις αντλίες να λειτουργούν στο 90% των

στροφών τους, ενώ για λειτουργία υπό χαμηλό φορτίο, 65% του MCR, τότε η ανάγκη λειτουργίας των αντλιών περιορίζεται στο 70% των στροφών τους. Αυτό σημαίνει δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας από 15% έως και 65% ανάλογα και με το προφίλ λειτουργίας του πλοίου.

Η πιο αποδοτική λειτουργία και η εξοικονόμηση ενέργειας δεν είναι το μόνο πλεονέκτημα του συστήματος VFD. Η ομαλή εκκίνηση των κινητήρων που επιτυγχάνεται, απουσία υψηλών ρευμάτων, ωφελεί στην ομαλή λειτουργία και αξιοπιστία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου. Δεν υπάρχουν απότομες μεταβολές τάσης, άρα δεν επηρεάζονται και οι υπόλοιποι ενεργειακοί καταναλωτές. Επίσης, μειώνεται η θερμική και μηχανική καταπόνηση στους κινητήρες, κάτι που προσδίδει αυξημένη διάρκεια ζωής τους.

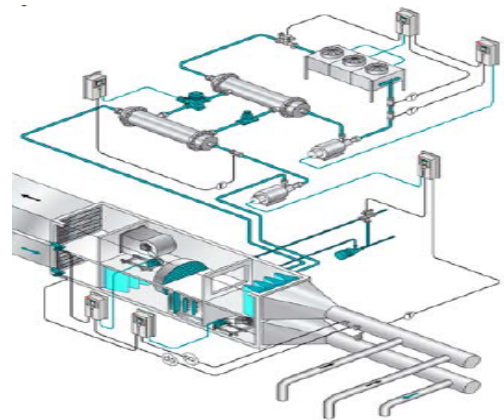
Αυτό που αποτελεί σημαντικό θέμα και πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα κατά τη διαστασιολόγηση των συστημάτων με αντλίες είναι το φαινόμενο της σπηλαίωσης. Η σπηλαίωση εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της ατμοποίησης του υγρού η οποία συμβαίνει όταν ξαφνική αύξηση της ταχύτητας του υγρού, οδηγεί στην πτώση της τοπικής πίεσης του, κάτω από την πίεση ατμοποίησης του, δημιουργώντας έναν θύλακα ατμού. Το ίδιο μπορεί να συμβεί με τοπική αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού. Η σπηλαίωση μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην αντλία και συγκεκριμένα στην φτερωτή, που μπορεί να προκαλέσουν σημαντική φθορά μέσα σε λίγους μήνες. Με τη χρησιμοποίηση συστήματος Variable Frequency Drive, ο κίνδυνος αυτός περιορίζεται. [10]

Οι φυγοκεντρικές αντλίες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην ναυτιλία. Αυτός ο τύπος αντλίας έχει τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας, όπως οι ανεμιστήρες που χρησιμοποιούνται για τον αερισμό και εξαερισμό χώρων, όπως του μηχανοστασίου. Άρα η ίδια μέθοδος ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στους ανεμιστήρες, συμβάλλοντας σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας μειώνοντας απλά τις στροφές των κινητήρων τους. Μάλιστα η εφαρμογή συστήματος VFD στους τέσσερις ανεμιστήρες του μηχανοστασίου (E/R Supply Fans) σύμφωνα με [13] αποτελεί μια καλή, εύκολη και φθηνή λύση που προσφέρει εξοικονόμηση σημαντικών ποσών ενέργειας και σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Επιγραμματικά για ένα tanker που εξετάζεται στην [13] υπολογίζεται ότι εξοικονομούνται 35700\$ και 174,35 t CO₂ ανά έτος με ένα κόστος επένδυσης 30000\$. Τέλος πρακτική εφαρμογή βρίσκει επίσης και στο σύστημα του κλιματισμού του πλοίου, θέμα το οποίο θα μας απασχολήσει στην επόμενη παράγραφο.

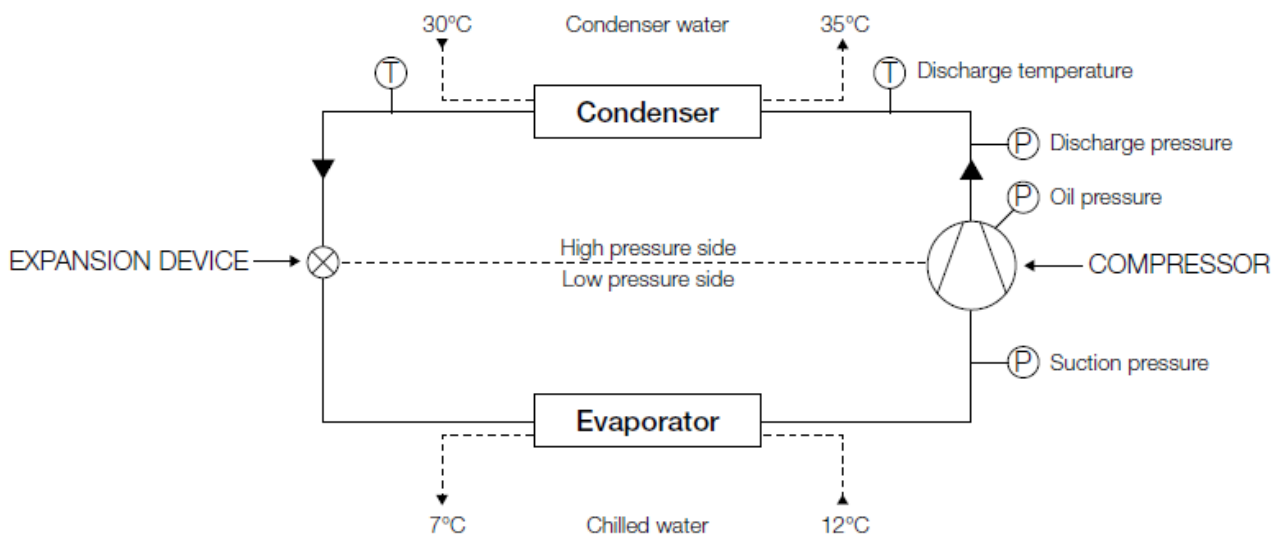
2.4 Βελτιστοποίηση του συστήματος κλιματισμού με χρήση Variable Frequency Drive σε αντλίες, συμπιεστές και ανεμιστήρες.

Το σύστημα κλιματισμού-εξαερισμού (HVAC) είναι ο πιο μεγάλος καταναλωτής ενέργειας μετά τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την κίνηση του πλοίου, ειδικά σε πλοία που μεταφέρουν επιβάτες. Κάθε τέτοιο σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: το σύστημα ψύξης (chiller plant), το κύκλωμα σωληνώσεων και την κλιματιστική μονάδα (air handling unit). Ένα τυπικό σύστημα HVAC φαίνεται στην Εικόνα 2-5.

Το chiller plant έχει σημαντικό ρόλο στο σύστημα κλιματισμού καθώς είναι αυτό που δίνει το κρύο νερό στην κλιματιστική μονάδα (AHU). Χρησιμοποιεί συμπιεστές (compressors), συμπυκνωτές (condensers) ατμοποιητές (evaporators) και βαλβίδες που ελέγχουν τη ροή του ψυκτικού μέσου. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι συμπιεστές είναι οι φυγοκεντρικοί (centrifugal) και οι τύπου screw. Χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την πίεση και τη θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου, το οποίο βρίσκεται σε αέρια φάση. Στη συνέχεια, ο συμπυκνωτής το ψύχει και το μετατρέπει σε υγρή φάση. Έπειτα, περνά από τη βαλβίδα (expansion valve) όπου η πίεση και η θερμοκρασία του υγρού πέφτουν. Το κρύο μείγμα, υγρή και αέρια φάση συνυπάρχουν, οδηγείται στο evaporator όπου και επιστρέφει σε αέρια φάση. Τέλος, το αέριο εισέρχεται στον συμπιεστή και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. [10]

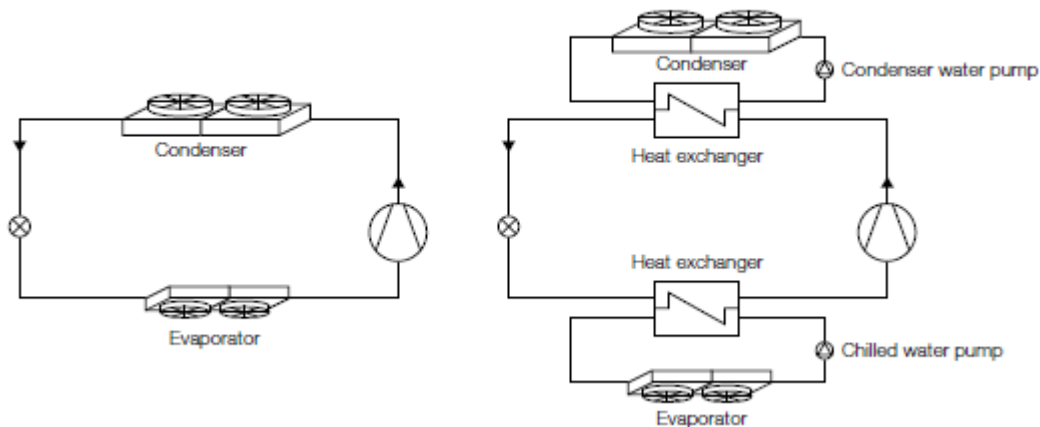


Εικόνα 2-5: Σύστημα HVAC.



Εικόνα 2-6: Chiller Plant

Ένα σύστημα κλιματισμού μπορεί να σχεδιαστεί να είναι είτε άμεσο, όπου το ψυκτικό μέσο μεταφέρει τη ζέστη έξω από το χώρο που ψύχεται προς το περιβάλλον, είτε να χρησιμοποιεί δευτερεύοντα κυκλώματα με εναλλάκτες που αναλαμβάνουν αυτό το έργο. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτούνται επίσης επιπλέον αντλίες για να κυκλοφορεί το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιείται, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-7.

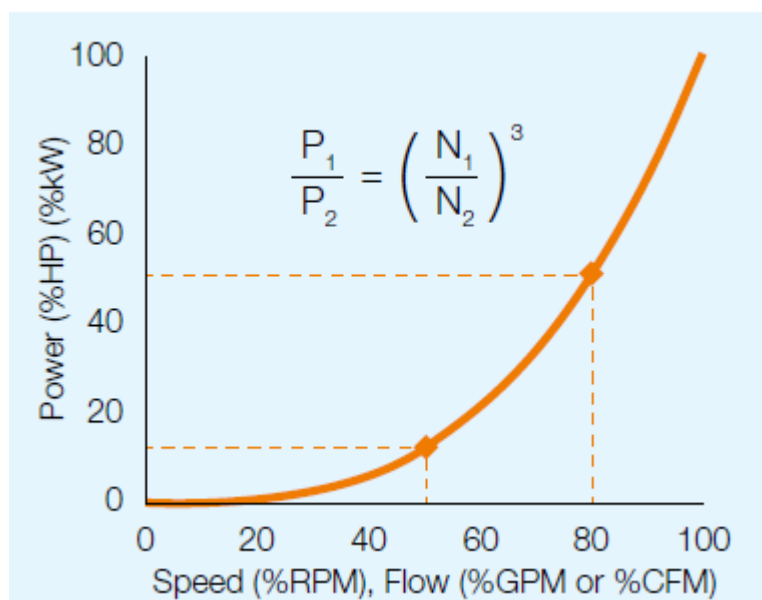


Εικόνα 2-7: Άμεσο και έμμεσο σύστημα κλιματισμού

Όταν υπάρχουν περιπτώσεις όπου το ψυκτικό φορτίο μεταβάλλεται σημαντικά από αυτό για το οποίο διαστασιολογήθηκε το σύστημα, κάτι το οποίο είναι συχνό φαινόμενο, τότε υπάρχει ανάγκη για μεταβλητή ροή του νερού που κυκλοφορεί στο σύστημα. Αυτό εξυπηρετεί σε πολλές περιπτώσεις γι' αυτό άλλωστε και τα συστήματα με δευτερεύοντα κυκλώματα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται και πιο συχνά. Μεταβλητή ροή νερού μπορεί να επιτευχθεί μεταβάλλοντας την ταχύτητα των αντλιών, είτε στο μέρος του condenser είτε του evaporator. Όταν το ψυκτικό φορτίο διαφέρει σημαντικά, τότε θα πρέπει να εξεταστεί η χρησιμοποίηση Variable Frequency Drive στις αντλίες στη μεριά του evaporator τόσο σε συστήματα μεταβλητής ροής όσο και σταθερής πίεσης.

Ένα σύστημα σταθερής πίεσης είναι πάντοτε υπερδιαστασιολογημένο για λόγους ασφαλείας και η πίεση στο σύστημα κρατείται σταθερή ανοίγοντας και κλείνοντας χειροκίνητα κάποιες βαλβίδες. Η χρησιμοποίηση VFD για να ελεγχθεί η πίεση, με εντελώς ανοιχτές τις βαλβίδες αυτές, θεωρείται ενεργειακά πιο αποδοτική λύση. Εξοικονόμηση ενέργειας έως και 30% σε σχέση με τον έλεγχο μέσω ρυθμιστικών βαλβίδων μπορεί να επιτευχθεί χάρη στο VFD.

Τα συστήματα αυτά, ειδικά στην πλευρά του συμπυκνωτή, είναι σχεδιασμένα με βάση τον τρόπο που θα δουλεύει ένα πλοίο. Για παράδειγμα, αν ένα πλοίο λειτουργεί σε θερμά νερά (πχ Καραϊβική) τότε η διαστασιολόγηση γίνεται για μια θερμοκρασία νερού μεταξύ 32-35°C. Όταν όμως αυτό το πλοίο ταξιδεύει σε πιο ψυχρά νερά, τότε υπάρχει ανάγκη αλλά και δυνατότητα για μεταβολή της ροής του νερού που εισέρχεται στον συμπυκνωτή. Εισάγοντας VFD για τον έλεγχο της ταχύτητας της αντλίας σε μια τέτοια περίπτωση, η ροή μπορεί να μειωθεί έως και 40%. Μεταβάλλοντας τις στροφές της αντλίας, μεταβάλλεται ανάλογα και η ροή. Όμως η ισχύς που απαιτεί η αντλία, μεταβάλλεται ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητας. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και αν απαιτείται μια μικρή μείωση της ροής, για παράδειγμα κατά 20%, τότε αυτό συνεπάγεται 50% λιγότερη απαιτούμενη ισχύ, άρα και ενέργεια. Στο Διάγραμμα 2- απεικονίζεται αυτό που μόλις αναφέρθηκε. [10]



Διάγραμμα 2-4: Σχέση στροφών-ισχύος αντλίας

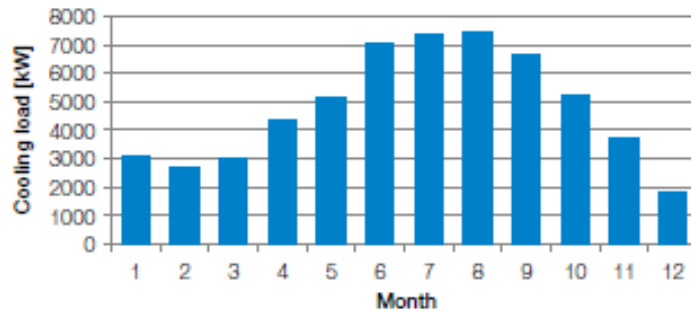
VFD όμως μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον έλεγχο των συμπιεστών. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι συμπιεστές είναι οι τύπου screw, αν και στις νέες εφαρμογές οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές προτιμώνται περισσότερο λόγω της ευελιξίας τους σε λειτουργία μερικού φορτίου όταν συνδυάζονται με VFD.

Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές χρησιμοποιούν μια κινούμενη φτερωτή για να μεταφέρουν κινητική ενέργεια στο ψυκτικό μέσον. Αυτή η ενέργεια είναι που μετατρέπεται σε αύξηση της πίεσης. Είναι κατάλληλοι για χρήση όταν ο όγκος ψυκτικού μέσου είναι μεγάλος και απαιτείται μικρή συμπίεση. Υπάρχουν φυσικά και συμπιεστές πολλών σταδίων συμπίεσης, με δύο ή περισσότερες φτερωτές δηλαδή, για περιπτώσεις όπου απαιτείται πιο υψηλή συμπίεση.

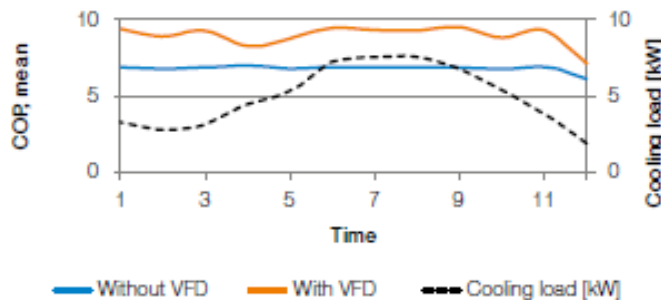
Δύο τρόποι υπάρχουν για τον έλεγχο τέτοιων συμπιεστών: η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της φτερωτής και τα prerotation vanes τα οποία αλλάζουν την κατεύθυνση εισόδου του ψυκτικού μέσου στην φτερωτή. Η πιο οικονομική είναι η λύση της μεταβολής της ταχύτητας. Επειδή στα πολύ χαμηλά φορτία, δηλαδή στις χαμηλές στροφές, υπάρχει πιθανότητα η φτερωτή να μην έχει την απαραίτητη ροπή για να κινήσει το ψυκτικό μέσον, ένας συνδυασμός των δύο τρόπων είναι αυτός που επιλέγεται τελικά ώστε να περιορισθεί το πρόβλημα αυτό. Ο έλεγχος των συμπιεστών γίνεται με βάση τη μέτρηση θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου όταν είναι σε υγρή μορφή, η οποία γίνεται με θερμική επαφή με το νερό εξόδου από τον evaporator.

Εγκαθιστώντας VFD σε φυγοκεντρικό συμπιεστή πρέπει να ληφθούν υπόψη όλα τα παραπάνω. Αυτό είναι πολύ απλό σε καινούργιες κατασκευές. Δεδομένης όμως της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας στα συστήματα κλιματισμού, έντονο ενδιαφέρον έχει προκύψει τα τελευταία χρόνια για ενσωμάτωση VFD σε παλιά συστήματα, ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή τους. Σαν παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την περίπτωση που πλοίου που παρουσιάζει ανάγκες για ψύξη όπως αυτές του

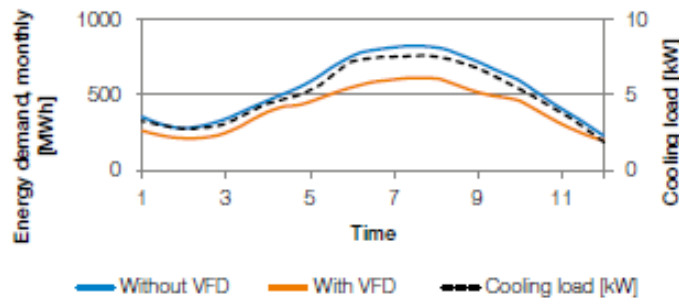
Διαγράμματος 2-5. Συνολικά 6242MWh ενέργειας καταναλώνονται ετησίως, ενώ με τη χρήση VFD η κατανάλωση έπεσε στις 4700MWh. Παρατηρήθηκε δηλαδή 25% εξοικονόμηση ενέργειας, που αντιστοιχεί σε περίπου 300 τόνους πετρελαίου, δίνοντας έτσι απόσβεση της επένδυσης σε δύο έτη. [10]



Διάγραμμα 2-5: Ανάγκες ψύξης ανά μήνα του έτους



Διάγραμμα 2-6: COP συστήματος



Διάγραμμα 2-7: Μηνιαίες ανάγκες σε ενέργεια

Εκτός όμως από τις αντλίες και τους συμπιεστές, περιθώρια βελτίωσης της απόδοσής τους έχουν και οι ανεμιστήρες που χρησιμοποιούνται στις κλιματιστικές μονάδες (Air Handling Units AHU). Σκοπός τους είναι η προσαγωγή και η απόρριψη (supply and return fans) του αέρα προς και από τον κλιματιζόμενο χώρο σύμφωνα με τις ανάγκες. Οι ανεμιστήρες αυτοί καταναλώνουν το 40% της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στο σύστημα κλιματισμού. Και ο λόγος δεν είναι τόσο στο ότι δεν γίνεται σωστή επιλογή του κατάλληλου ανεμιστήρα, ή ότι γίνεται υπερδιαστασιολόγηση για να καλυφθούν και οι πιο ακραίες περιπτώσεις. Ο λόγος είναι ότι οι ανεμιστήρες έχουν χαμηλή απόδοση, της τάξεως του 33%. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα πλοίο μπορεί να έχει 15-40 ανεμιστήρες,

έως και 70 σε κρουαζιερόπλοια, και ότι βρίσκονται σε μόνιμη λειτουργία όλο το 24ωρο, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τεράστια ποσά ενέργειας θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν.

Συνήθως οι σημερινοί ανεμιστήρες αποτελούνται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) και μια φτερωτή σχεδιασμένη έτσι ώστε να παρουσιάζει χαμηλές αεροδυναμικές απώλειες. Για μεγάλες παροχές αέρα και υψηλές πιέσεις είναι προτιμότεροι οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε συνδυασμό με VFD για τον έλεγχό τους. Ο κινητήρας και η φτερωτή θα πρέπει να είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο άξονα αν και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ιμάντες (drive belts) για την κίνηση των φτερωτών. Επίσης, αν και συνήθως οι κινητήρες είναι σταθερών στροφών, είναι πολύ συχνή η χρησιμοποίηση κινητήρων δύο ταχυτήτων για μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο της ταχύτητας με τίμημα βέβαιο την χαμηλή απόδοση. Διάφοροι αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, ποσότητας CO₂ καθορίζουν την απαιτούμενη παροχή σε αέρα προς το χώρο που κλιματίζεται. Η παροχή αέρα ρυθμίζεται μέσω dampers τα οποία ανοίγουν ή κλείνουν αφήνοντας περισσότερο ή λιγότερο αέρα να εισέλθει στο χώρο. Όμως αυτό δεν σημαίνει ρύθμιση των στροφών και φυσικά δεν εξοικονομείται και ενέργεια.

Η χρήση VFD για τον έλεγχο της ταχύτητας των ανεμιστήρων αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο για την βελτιστοποίηση της απόδοσης τους. Ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται κινητήρες δύο ταχυτήτων, τα περιθώρια βελτίωσης με VFD είναι ακόμα μεγαλύτερα. Το κριτήριο για την ταχύτητα των ανεμιστήρων μπορεί να είναι οποιαδήποτε μέτρηση από τους αισθητήρες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του VFD είναι:

- Ακριβής έλεγχος και λειτουργία του συστήματος σύμφωνα με τις στιγμιαίες ανάγκες και όχι με τις θεωρητικές σύμφωνα με τις οποίες σχεδιάστηκε.
- Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας στους κινητήρες.
- Καλύτερος έλεγχος του αέρα που σημαίνει και καλύτερη ποιότητα αέρα άρα δημιουργούνται συνθήκες άνεσης στο χώρο και υγιές περιβάλλον.
- Μειωμένη καταπόνηση και φθορές στους κινητήρες και στις φτερωτές, μειωμένες ανάγκες συντήρησης και αντικατάστασης.

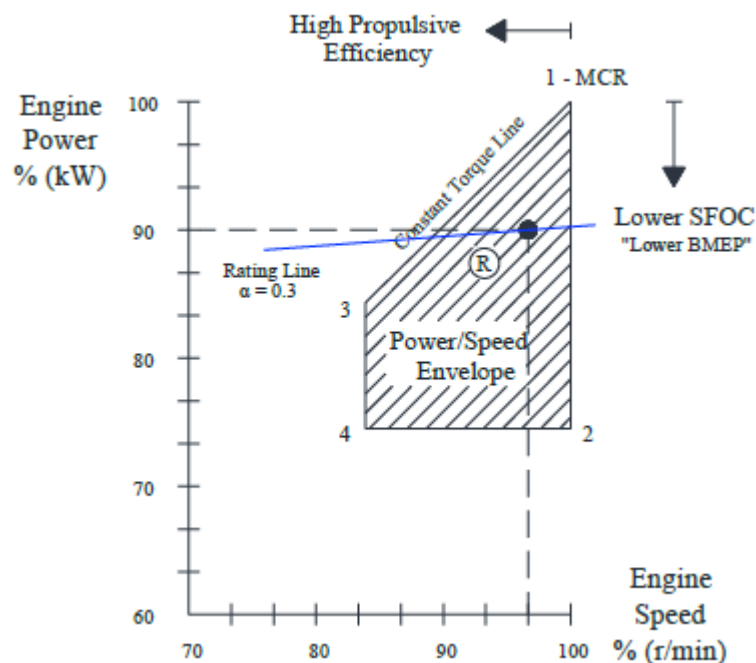
Κλείνοντας το κεφάλαιο του συστήματος κλιματισμού, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε συγκεντρωτικά τα οφέλη από την εγκατάσταση VFD: [10]

- Ακριβής και απόλυτος έλεγχος της ενεργειακής κατανάλωσης στις αντλίες νερού στη μεριά του evaporator, με δυνατότητες εξοικονόμησης μεταξύ 30-40% και χρόνο απόσβεσης της επένδυσης λιγότερο του ενός έτους.
- Στους ανεμιστήρες προσαγωγής και επιστροφής του αέρα είναι η καλύτερη ποιότητα αέρα και η παροχή του σύμφωνα με τις στιγμιαίες ανάγκες. Κι εδώ ο χρόνος απόσβεσης είναι μικρότερος του ενός έτους.

- Εξοικονόμηση έως και 25% στην κατανάλωση ενέργειας στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές.

2.5 Βελτιστοποίηση Κύριας Μηχανής για μικρότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC)

Η Κύρια Μηχανή ενός πλοίου είναι σχεδιασμένη και βελτιστοποιημένη ώστε να λειτουργεί σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών και ταχύτητα πλεύσης, έχοντας ταυτόχρονα και συγκεκριμένη κατανάλωση καυσίμου (SFC). Αν όμως τελικά η ταχύτητα λειτουργίας είναι μικρότερη από αυτή του σχεδιασμού, όπως συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις για εξοικονόμηση καυσίμου, τότε υπάρχει τρόπος να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία της Κύριας Μηχανής και να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες λειτουργίας, μερικού ή χαμηλού φορτίου (part load, low load). Ουσιαστικά αυτό που γίνεται είναι να «υποβιβάζεται» η μηχανή ώστε να λειτουργεί με βέλτιστο τρόπο σε λιγότερες στροφές. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2-8 που ακολουθεί, το σημείο λειτουργίας της Κύριας Μηχανής, μετατοπίζεται από το 1.MCR στο σημείο R, με μειωμένες στροφές αλλά και μειωμένη ισχύ. [4]



Διάγραμμα 2-8: Βελτιστοποίηση Κύριας Μηχανής

Η κίνηση αυτή επιτυγχάνει μείωση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου, μετατοπίζοντας το βέλτιστο σημείο λειτουργίας από πλευράς κατανάλωσης καυσίμου, όσο το δυνατόν πιο κοντά στο πραγματικό σημείο λειτουργίας της μηχανής. Αυτό προϋποθέτει όπως αναφέρθηκε και μείωση της μέγιστης ταχύτητας στο MCR κατά 10-15%. Σε αυτήν την περίπτωση, η εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί είναι της τάξεως του 10-12%. Η μείωση στην ταχύτητα πλεύσης σημαίνει ότι ένα ταξίδι θα απαιτούσε περισσότερο χρόνο σε σχέση με πριν, αυξάνοντας τα λειτουργικά έξοδα του πλοίου.

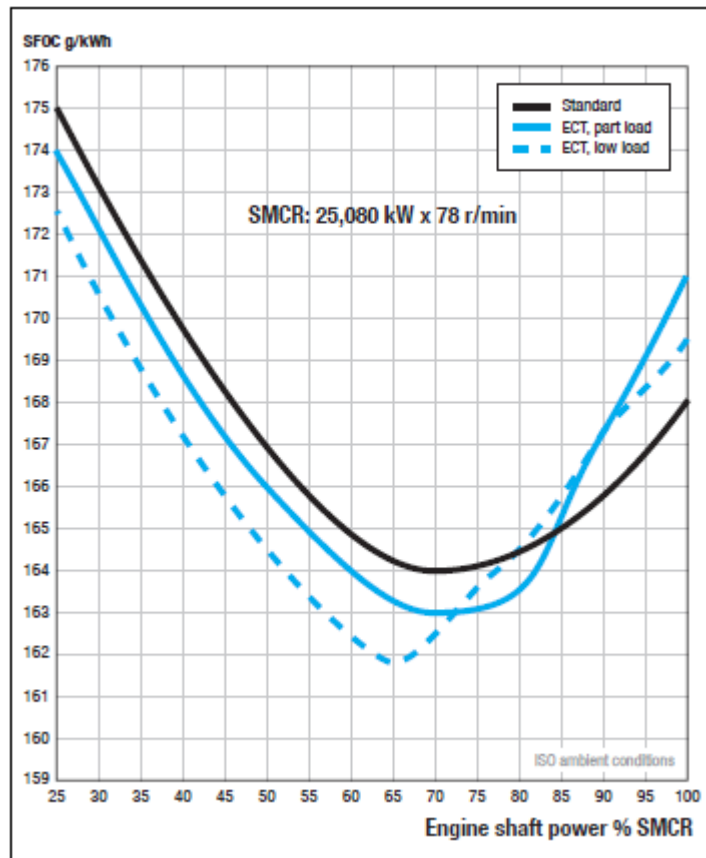
Ταυτόχρονα όμως επηρεάζονται και τα βοηθητικά συστήματα που συνδέονται με τη λειτουργία της Κύριας Μηχανής όπως η λίπανση της. Επίσης, η μειωμένη κατανάλωση, συνεπάγεται και μικρότερες ανάγκες για αποθήκευση καυσίμου, για λειτουργία των heaters και των purifiers και ίσως και των αντλιών, κάτι που σημαίνει και εξοικονόμηση καυσίμων από τη μικρότερη χρήση των ηλεκτρογεννητριών. Διπλό όφελος δηλαδή

Με ποιους τρόπους όμως επιτυγχάνεται η μείωση της ειδικής κατανάλωσης της Κύριας Μηχανής;

2.5.1 Engine Control Tuning

Ένας τρόπος είναι επηρεάζοντας τις ρυθμίσεις της Μηχανής (Engine Control Tuning). Μία Μηχανή σχεδιάζεται να λειτουργεί στη μέγιστη Πίεση Κυλίνδρου P_{max} . Μία «υποβιβασμένη» μηχανή λειτουργεί με μικρότερη Μέση Πίεση Πέδησης (Break Mean Effective Pressure) και μικρότερη ταχύτητα περιστροφής, κρατώντας όμως σταθερή την P_{max} , με σκοπό την μείωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC). Για να επιτευχθεί η μείωση στην BMEP, και συνεπώς μείωση κατανάλωσης, γίνονται αλλαγές στους χρόνους έγχυσης καυσίμου στους κυλίνδρους, αυξάνοντας έτσι την αναλογία $P_{max}/BMEP$. Οι αλλαγές αυτές δεν απαιτούν αλλαγή ή αντικατάσταση κάποιων από τα εξαρτήματα της μηχανής. Φυσικά σε ηλεκτρονικές μηχανές οι αλλαγές γίνονται ακόμα πιο εύκολα, μιας και όλα αυτά ρυθμίζονται από την Κεντρική Μονάδα Ελέγχου.

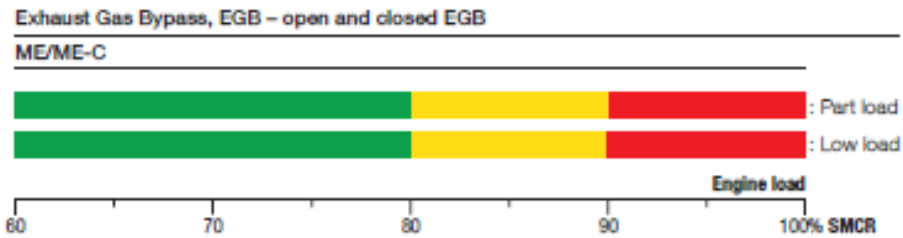
Σε περίπτωση που οι ρυθμίσεις αυτές γίνουν για μερικό φορτίο (part load), τότε η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνεται περίπου 1gr/kWh σε περιοχές λειτουργίας κάτω από το 85% του MCR, με τίμημα βέβαια τη μεγαλύτερη κατανάλωση στην περιοχή 85-100% MCR. Η ελάχιστη κατανάλωση εμφανίζεται στο 70-75% του MCR. Ρυθμίζοντας τη Μηχανή για βελτιστοποίηση στο χαμηλό φορτίο (low load), η εξοικονόμηση είναι 3gr/kWh και συμφέρει όταν η περιοχή λειτουργίας είναι κάτω από το 70% του MCR με το ελάχιστο να εμφανίζεται στο 65% του MCR. Το Διάγραμμα 2-9 δείχνει γραφικά αυτές τις μεταβολές για την ηλεκτρονική Κύρια Μηχανή της MAN, 6S80ME-C8.2. [14]



Διάγραμμα 2-9: Μεταβολή SFOC με Engine Control Tuning.

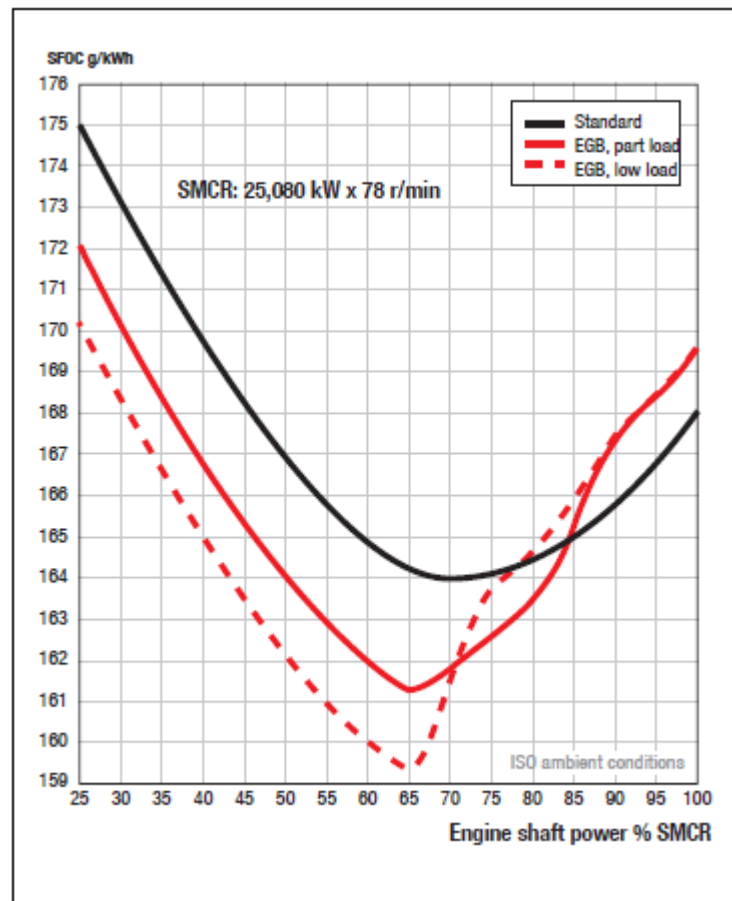
2.5.2 Exhaust Gas Bypass

Αυτή η μέθοδος απαιτεί εγκατάσταση ώστε να δημιουργηθεί δρόμος για κάποιο ποσοστό των καυσαερίων να παρακάμπτει τα turbochargers (bypass). Μια βαλβίδα, bypass valve, ορίζει το ποσοστό καυσαερίων που θα περνούν προς τα turbochargers, ρυθμίζοντας πρακτικά τις στροφές λειτουργίας τους, και άρα την πίεση στην οποία θα συμπιέζεται ο αέρας εισαγωγής στους κυλίνδρους της Κύριας Μηχανής. Το πότε αυτή η βαλβίδα θα είναι ανοιχτή ή κλειστή εξαρτάται από το αν η ρύθμιση θα γίνει για μερικό ή χαμηλό φορτίο. Για την Μηχανή της MAN που αναφέρθηκε και προηγουμένως, 6S80ME-C8.2, το προφίλ λειτουργίας της βαλβίδας αυτής παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-. Μέχρι το 80% του MCR είναι εντελώς ανοιχτή, στο 80-90% είναι μερικώς ανοιχτή, ενώ από το 90% του MCR, η βαλβίδα είναι εντελώς κλειστή, οδηγώντας όλα τα καυσαέρια προς τα turbochargers.



Εικόνα 2-8: Προφίλ λειτουργίας bypass βαλβίδας

Με εφαρμογή του Exhaust Gas Bypass σε μερικό φορτίο, η ειδική κατανάλωση είναι μικρότερη κατά 2-3gr/kWh σε περιοχή λειτουργίας έως το 85% του MCR με βέλτιστη κατανάλωση στο 65%. Αντίστοιχα για χαμηλό φορτίο, υπάρχει επιπλέον εξοικονόμηση 2gr/kWh σε περιοχές έως το 70% του MCR, με το ελάχιστο να εμφανίζεται και πάλι στο 65%. Γραφικά παρουσιάζονται όλα τα παραπάνω στο Διάγραμμα 2-10. [14]



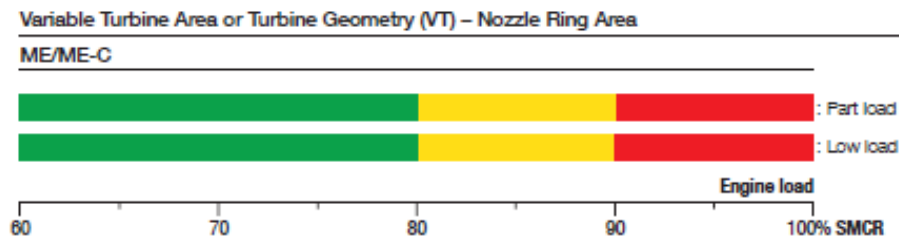
Διάγραμμα 2-10: Βελτιστοποίηση SFOC με Exhaust Gas Bypass

2.5.3 Μεταβολή Γεωμετρίας των Turbochargers

Η μέθοδος αυτή (Variable Turbine Area VTA) είναι αρκετά επεμβατική και προϋποθέτει την αλλαγή συγκεκριμένων μερών των turbochargers. Συγκεκριμένα το nozzle ring θα πρέπει να έχει τη

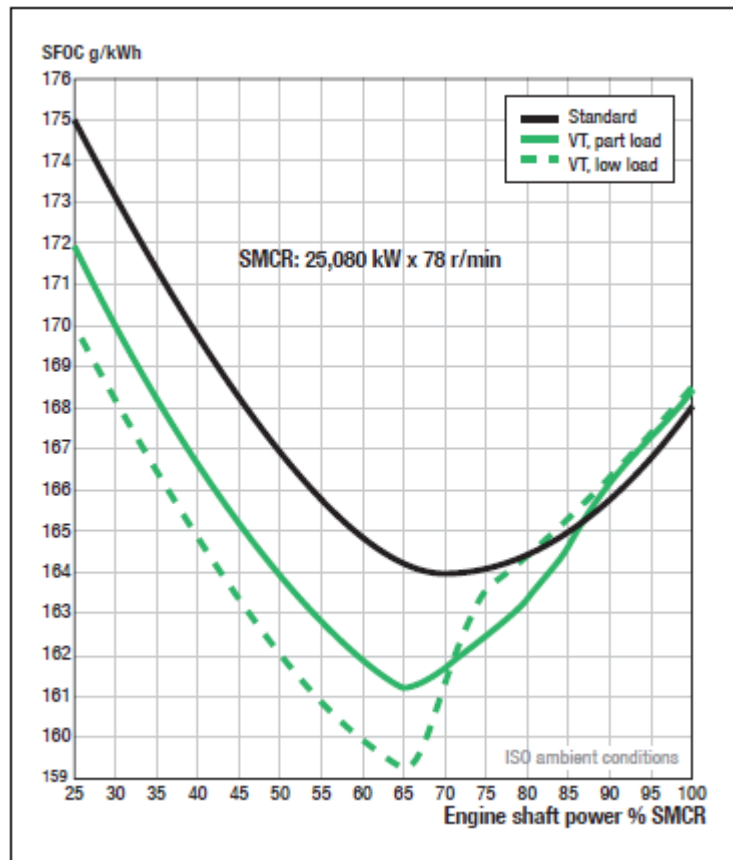
δυνατότητα μεταβολής της επιφάνειάς του, δηλαδή της γεωμετρίας των πτερυγίων του ώστε ανάλογα με την περίπτωση να μετατρέπει την πίεση των καυσαερίων σε λιγότερη ή περισσότερη κινητική ενέργεια.

Το προφίλ λειτουργίας είναι παρόμοιο με εκείνο της Bypass βαλβίδας. Δηλαδή όταν η Μηχανή λειτουργεί κάτω από το 80%, τότε η γεωμετρία αλλάζει μικραίνοντας την επιφάνεια του nozzle ring στο ελάχιστο, από το 80-90% η επιφάνεια αυξάνει, ενώ από το 90% του MCR και μετά, η επιφάνεια γίνεται μέγιστη, μετατρέποντας σε μέγιστη κινητική ενέργεια την πίεση των καυσαερίων.



Εικόνα 2-9: Προφίλ μεταβολής γεωμετρίας των turbochargers

Με βελτιστοποίηση της Κύριας Μηχανής για λειτουργία υπό μερικό φορτίο, η ειδική κατανάλωση είναι μικρότερη κατά 3gr/kWh σε περιοχή λειτουργίας έως το 85% του MCR με βέλτιστη κατανάλωση στο 65%. Αντίστοιχα για χαμηλό φορτίο, υπάρχει επιπλέον εξοικονόμηση 1,5gr/kWh σε περιοχές έως το 70% του MCR, με το ελάχιστο να εμφανίζεται και πάλι στο 65%. Το Διάγραμμα 2-11 αφορά σε εφαρμογή της μεθόδου VT στην MAN, 6S80ME-C8.2. [14]



Διάγραμμα 2-11: Βελτιστοποίηση SFOC με μεταβολή γεωμετρίας των turbochargers

Προσαρμογές, εκτός από την Κύρια Μηχανή, ενδέχεται να χρειαστεί και η προπέλα, η οποία είναι και αυτή σχεδιασμένη και προσαρμοσμένη σε συγκεκριμένες στροφές και ταχύτητα λειτουργίας. Οπότε εφόσον εφαρμοσθούν κάποιες από τις παραπάνω μεθόδους στην Κύρια Μηχανή, θα πρέπει να μελετηθεί επανασχεδιασμός και αλλαγή της προπέλας ώστε να γίνει βέλτιστη η λειτουργία της σε λιγότερες στροφές. Σε τέτοια περίπτωση αυτό που απαιτείται είναι η τοποθέτηση προπέλας με μεγαλύτερη διάμετρο.

2.6 Βελτιστοποίηση συνεργασίας πλοίου-προπέλας

Υπάρχουν αρκετές λύσεις που θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη συνεργασία πλοίου-προπέλας και να συμβάλλουν στην εξοικονόμηση καυσίμου. Μεγάλη σημασία έχει οι λύσεις αυτές να είναι πρακτικά απλές, να μην απαιτούν πολλές τροποποιήσεις ώστε να είναι φθηνές και εύκολες στην κατασκευή και την τοποθέτηση. Σκοπός των περισσότερων είναι να βελτιώσουν την ροή του νερού από και προς την προπέλα ώστε να γίνει πιο αποδοτική η λειτουργία της. Στη συνέχεια θα δούμε μερικές από αυτές τις λύσεις.

2.6.1 Pre-swirl Stator

Η Daewoo Shipbuilding and Marine Engineer (DSME) ανέπτυξε το pre-swirl stator (PSS), το οποίο είναι μια συσκευή με σταθερά πτερύγια, που τοποθετείται ακριβώς μπροστά από την προπέλα και σχεδιάζεται έτσι ώστε να δημιουργεί τέτοια ροή και δίνες στο νερό που θα περάσει από την προπέλα με σκοπό να βελτιώσει την απόδοσή της.

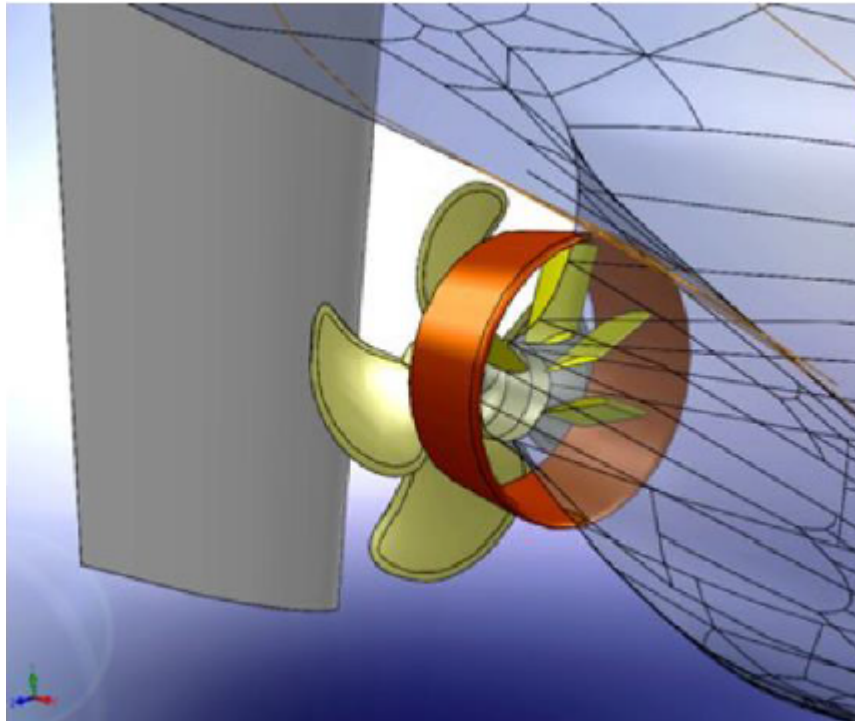


Εικόνα 2-10: Pre-swirl Stator

Κατά καιρούς έχουν δοκιμαστεί εφαρμογές με τρία έως έξι πτερύγια σε διάφορες διατάξεις και σχήματα. Η διάταξη όμως που παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα είναι αυτή με τα τέσσερα πτερύγια διαμέτρου ίσης με την προπέλα. Τα πτερύγια αυτά δημιουργούν δίνες στο νερό με αντίθετη φορά από αυτή που δημιουργεί η προπέλα, μειώνονται οι απώλειες στρέψης, βελτιώνεται η απόδοση της προπέλας και έτσι μειώνεται η ανάγκη για ισχύ. Αυτή η διάταξη έγινε η πρότυπη κατασκευή για αρκετούς τύπους πλοίων όπως VLCC, tankers, containerships και bulk carriers με ένα μέσο κέρδος της τάξεως του 4% στην απαιτούμενη ισχύ και 0,2 κόμβους στην ταχύτητα πλεύσης, το οποίο επιβεβαιώνεται τόσο σε εργαστηριακές μετρήσεις όσο και σε πραγματικές δοκιμές. [15]

2.6.2 Becker Mewis Duct

Το Becker Mewis Duct είναι μια ενεργειακά πολύ αποδοτική συσκευή, που πήρε το όνομά της από τον εφευρέτη της, τον Friedrich Mewis. Η συσκευή αυτή τοποθετείται μπροστά από την προπέλα με σκοπό να βελτιώσει τη ροή των απόνερων προς αυτήν, να μειώσει τις απώλειες στρέψης και να αυξήσει το φορτίο στο εσωτερική ακτίνα της προπέλας ώστε να μειώσει τις δίνες. Εφαρμόζεται σε πλοία που λειτουργούν σε ταχύτητες έως 20 κόμβους, δηλαδή σε Tanker και Containers. [16]



Εικόνα 2-11: Becker Mewis Duct

Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι συνδυάζει τα θετικά στοιχεία δύο συσκευών, του pre-swirl stator και του δακτυλιδιού-σωλήνα (duct).

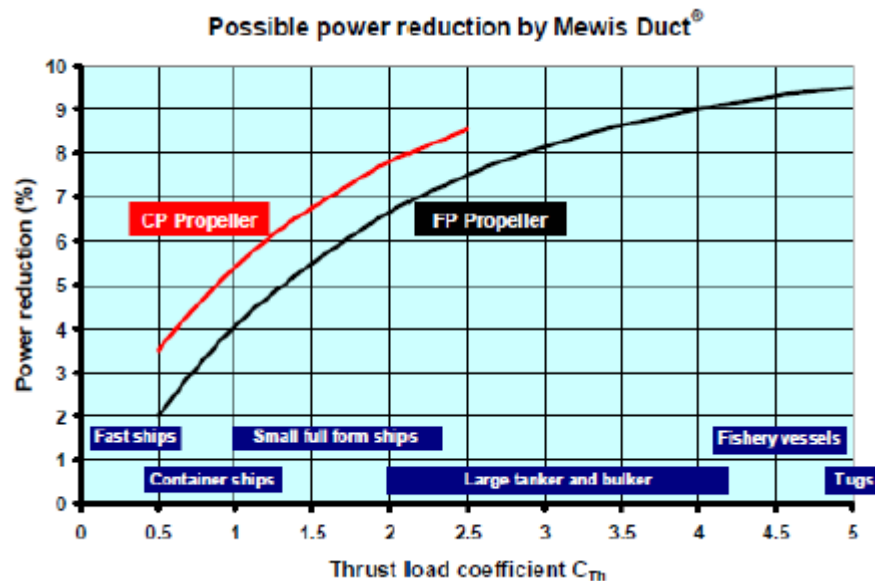
Ο δακτύλιος-σωλήνας, χάρη στο σχήμα του, από τη μία εξομαλύνει τα απόνερα που δημιουργούνται από την κίνηση του πλοίου και ταυτόχρονα τα οδηγεί ομοιόμορφα και με μεγαλύτερη ταχύτητα προς το πάνω μέρος της προπέλας, γεγονός που ευνοεί τη λειτουργία της. Τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε το κέντρο του να είναι παράλληλο στον άξονα της προπέλας. Το pre-swirl stator είναι σταθερά πτερύγια που εκτός από το να στηρίζουν τον δακτύλιο, δημιουργούν δίνες στο νερό που διέρχεται από αυτόν και μειώνουν τις απώλειες στρέψης. Φτιάχεται από ασύμμετρα τοποθετημένα πτερύγια και για να δημιουργηθούν οι δίνες κάποια θα πρέπει να ευνοούν τη ροή του νερού και κάποια να την εμποδίζουν. Απαιτείται ξεχωριστός σχεδιασμός και προσαρμογή για κάθε πλοίο καθώς εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα του hull, τον τρόπο ροής του νερού και το μέγεθος της προπέλας.

Οι καλύτερες πιθανότητες για μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για την κίνηση του πλοίου με τη χρήση του Mewis Duct εμφανίζονται όταν ο συντελεστής ώσης είναι μεγάλος και η ταχύτητα κίνησης μικρή. Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη, είναι η ακόλουθη:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_p V^2} \quad (2.2)$$

Με T είναι η ώση, ρ η πυκνότητα του νερού, A_p η επιφάνεια που καλύπτει η προπέλα και V η ταχύτητα πλεύσης.

Για το λόγο αυτό, ένα τέτοιο σύστημα είναι πιο κατάλληλο για μικρά φορτηγά πλοία, με μεγάλο συντελεστή ώσης και για tankers όλων των μεγεθών. Προς το παρόν το Mewis Duct δεν έχει την ίδια επιτυχία σε πλοία που κινούνται με μεγάλες ταχύτητες όπως και στα μεγάλα containerships. Τα ποσοστά εξοικονόμησης κινούνται από 2 έως 9-10% ανάλογα με την εφαρμογή. Στο Διάγραμμα 2-12 φαίνεται το ποσοστό μείωσης της απαιτούμενης ισχύος σε συνάρτηση με το συντελεστή ώσης ανά τύπου πλοίου. [16]



Διάγραμμα 2-12: Ποσοστό μείωσης απαιτούμενης ισχύος ανά τύπου πλοίου

Εκτός από το εμφανές πλεονέκτημα της εξοικονόμησης καυσίμου και συνεπώς χρημάτων, με το Mewis Duct επιτυγχάνεται μείωση των παραγόμενων ρύπων. Ταυτόχρονα συμβάλλει στη μείωση των κραδασμών και των δονήσεων κατά την πλεύση, ενώ το γεγονός ότι δεν περιλαμβάνει κινούμενα μέρη οδηγεί σε μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης και μηδενικό λειτουργικό κόστος. Η εγκατάστασή του είναι εύκολη και γρήγορη, ενώ δεν απαιτεί αλλαγή της προπέλας. [15]

2.6.3 Schneekluth Wake Equalizing Duct

Παρόμοιο σύστημα με το Mewis Duct είναι και το Schneekluth Wake Equalizing Duct (WED), σύστημα που προτάθηκε από τον καθηγητή Schneekluth το 1985. Πρόκειται για δύο ημι-δακτύλιους οι οποίοι στηρίζονται στο hull λίγο πριν την προπέλα όπως φαίνεται και στην σχετική Εικόνα 2-12.



Εικόνα 2-12: Schneekluth WED

Στόχος και αυτού του συστήματος είναι να βελτιώσει τη ροή του νερού προς την προπέλα. Επιτυγχάνεται ροή παράλληλη με τον άξονα του πλοίου και ισοκατανομή της ταχύτητας του νερού σε όλη την επιφάνεια του δίσκου της προπέλας. Μετρήσεις δείχνουν ότι η γωνία της ροής σε σχέση με τον άξονα του πλοίου μειώνεται από τις 20° στις 7° . Επίσης ο ασύμμετρος σχεδιασμός των δύο δακτυλίων, δίνει στην ροή περιστροφική κίνηση, αντίθετη από αυτή που προσδίδει η προπέλα, μειώνοντας έτσι τις απώλειες στρέψης. Συγχρόνως οι δονήσεις και οι κραδασμοί μειώνονται σε ποσοστό ως και 50% καθώς μειώνονται τα φορτία στις άκρες της προπέλας και η ευθεία ροή των απόνερων βελτιώνει επίσης και την απόδοση του πηδαλίου. Τέλος όπως και στο Mewis Duct, έτσι και εδώ, δεν απαιτούνται κατασκευαστικές αλλαγές και τροποποιήσεις στην προπέλα κάνοντας την τοποθέτησή του απλή και γρήγορη. [15]

Έπειτα από εφαρμογή σε περισσότερα από 1500 πλοία, έχει διαπιστωθεί πως με το WED εξοικονομείται έως και 12% των καυσίμων.

2.6.4 Propeller Boss Cap Fins (PBCF)

Η συσκευή αυτή στοχεύει στην ανάκτηση ενέργειας από την εξερχόμενη ροή της προπέλας. Ουσιαστικά πρόκειται για μια μικρότερη προπέλα ακριβώς μετά την προπέλα όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν.

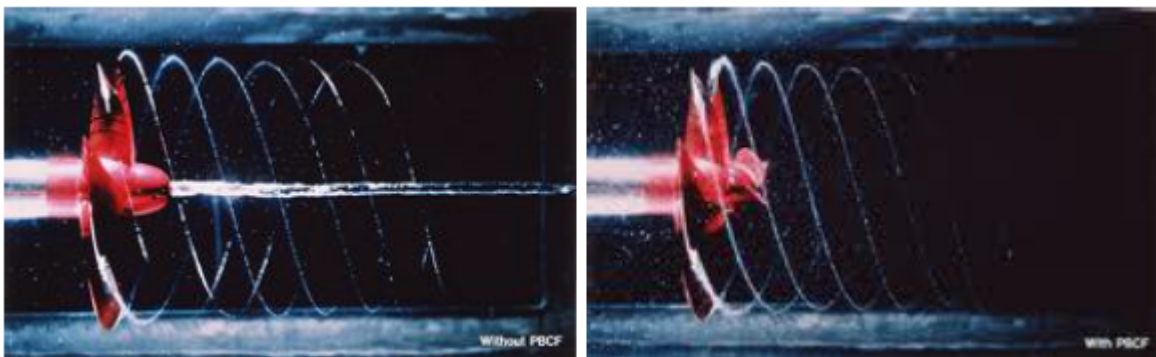


Εικόνα 2-13: Propeller Boss Cap Fins

Το «καπάκι» της προπέλας είναι πλέον κώνος με πτερύγια, όσα πτερύγια έχει και η προπέλα, και περιστρέφεται μαζί με την προπέλα. Η εγκατάστασή του είναι απλή και εύκολη καθώς η συσκευή βιδώνεται ακριβώς στις ίδιες τρύπες με το παλιό «καπάκι» και έτσι δεν χρειάζεται απολύτως καμιά μετατροπή. Έτσι είναι ιδανική επιλογή για εφαρμογή σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, σε κάθε τύπου πλοίου και προπέλας.

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα από την εγκατάστασή του είναι:

- 3-5% μείωση στην κατανάλωση καυσίμου
- Αντίστοιχη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων CO₂
- Μειωμένοι κραδασμοί και θόρυβος
- Λιγότερη διάβρωση στο πηδάλιο
- Απλή, εύκολη, γρήγορη εγκατάσταση και σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης καθώς δεν περιλαμβάνει κινούμενα μέρη. [15]



Εικόνα 2-14: Propeller Boss Cap Fins

Η ευκολία στην εγκατάσταση και το μικρό κόστος σε συνδυασμό με τη σημαντική μείωση στην κατανάλωση καυσίμου και την ευαισθητοποίηση στην προστασία του περιβάλλοντος μειώνοντας

τους ρύπους, έχουν κάνει το PBCF μια πολύ δημοφιλή συσκευή, μετρώντας πάνω από 3000 εφαρμογές. [17]

2.6.5 Counter Rotating Propeller (CRP)

Η αντίστροφα περιστρεφόμενη προπέλα είναι ένα μέτρο εξοικονόμησης καυσίμου που κατά καιρούς έχει δοκιμαστεί σε αρκετά πλοία. Μια δεύτερη προπέλα τοποθετείται ακριβώς πίσω από την προπέλα και περιστρέφεται προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Εικόνα 2-15: Counter Rotating Propeller

Η προπέλα αυτή ανακτά μέρος της ενέργειας από τη περιστροφική ροή του νερού της πρώτης προπέλας. Επίσης το ζευγάρι δέχεται λιγότερο φορτίο σε σχέση με την χρήση μιας προπέλας κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Μπορούν να είναι και οι δύο πάνω στην ίδιο άξονα ή πίσω να βρίσκεται σε άλλον, δεύτερον άξονα, πίσω από τον συμβατικό. Το σύστημα αυτό επιτυγχάνει μείωση της απαιτούμενης ισχύος κατά 10-15%. [15]

2.7 Χρήση συστήματος Air Lubrication στη γάστρα για μειωμένες τριβές

Τα μεγάλα πλοία όπως τα Containerships έχουν μεγάλες επιφάνειες σε επαφή με το νερό της θάλασσας και παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση στην κίνησή τους λόγω δυνάμεων τριβής. Αυτό σημαίνει μεγαλύτερες απαιτήσεις για πρόωση, κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου. Ένας τρόπος για να μειωθεί η αντίσταση αυτή είναι με το σύστημα Air Lubrication ή αλλιώς Air Cavity System.

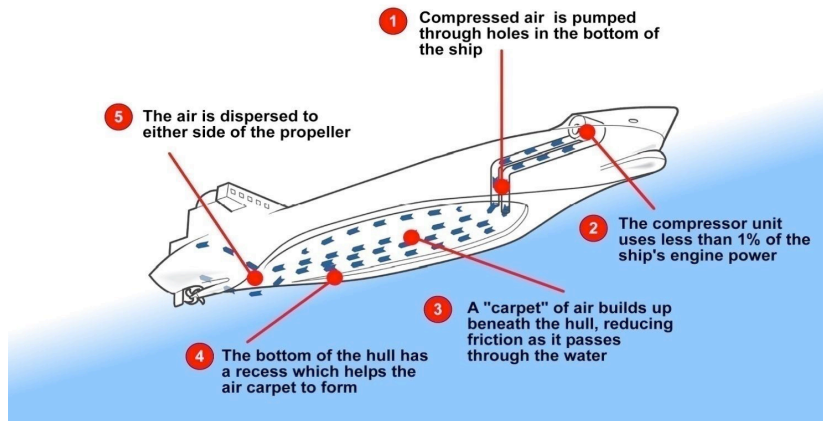


Εικόνα 2-16: Σύστημα Air Lubrication.

Το σύστημα αυτό μειώνει την αντίσταση του νερού δημιουργώντας ένα συνεχές στρώμα φυσαλίδων αέρα στο κάτω μέρος του πλοίου. Ουσιαστικά δημιουργείται ένα χαλί αέρα πάνω στο οποίο πλέει το πλοίο. Αυτό μειώνει τις απαιτήσεις για πρόωση. Η πρόκληση είναι οι φυσαλίδες αυτές να μένουν κάτω από το πλοίο και να μην οδηγούνται προς την επιφάνεια για αυτό και απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός του hull. Ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, η εξοικονόμηση στα καύσιμα πιστεύεται να είναι από 8 έως 15%, μειώνοντας σημαντικά τα λειτουργικά κόστη ενός πλοίου ενώ 15% υπολογίζεται πως είναι το ποσοστό μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων CO₂ που προέρχονται από την ναυτιλία. [18]

Η αρχή λειτουργίας αυτού του συστήματος είναι η εξής: Ένας αεροσυμπιεστής συμπιέζει αέρα σε πίεση 1,5bar ο οποίος οδηγείται μέσω τυπικών σωλήνων για τη μεταφορά αέρα στο κάτω μέρος του hull και μέσω μικρών οπών εξέρχεται προς το νερό. Το hull είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να δημιουργείται ένα χαλί αέρα, πάνω στο οποίο πλέει το πλοίο, έχοντας μειωμένες τριβές στην επαφή του με το νερό.

How ACS Works



Εικόνα 2-17: Πως λειτουργεί το Air Lubrication

Η εξοικονόμηση σε καύσιμα που υπολογίζεται με την εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος, φαίνεται στον Πίνακα 2-, αναλόγως του τύπου του πλοίου. [15]

Τύπος πλοίου	Ποσοστό εξοικονόμησης καυσίμου
Tanker	15%
Container	7.5%
PCTC	8.5%
Ferry	3.5%

Πίνακας 2-1: Ποσοστό εξοικονόμησης καυσίμου ανά τύπο πλοίου

Από την άλλη, όσο απλό κι αν ακούγεται στην εφαρμογή του ένα τέτοιο σύστημα, απαιτεί κατασκευές και μετατροπές στο εσωτερικό του πλοίου, κάτι που σημαίνει κόστος. Επίσης απαιτεί συντήρηση και επισκευές ανά τακτά χρονικά διαστήματα μιας και είναι από τα συστήματα με συνεχόμενη λειτουργία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ EEDI

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογισθεί ο δείκτης EEDI για τρία ενδεικτικά πλοία, διαφορετικού τύπου, ένα tanker (vessel 1) , ένα containership (vessel 2) και ένα bulk carrier (vessel 3). Ο υπολογισμός θα γίνει με βάση την εξίσωση 1.7 όπως δόθηκε στο Κεφάλαιο 1 και σύμφωνα με την MEPC 66/21.

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi}) + C_{FAE} * SFC_{AE} * P_{AE}}{f_i * f_c * f_l * Capacity * Vref * f_w} + \frac{((\prod_{j=1}^M f_j * \sum_{i=1}^n P_{PTIi} - \sum_{i=1}^n f_{eff} P_{AEff_i}) * C_{FAE} * SFC_{AE}) - \sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{F_{eff}} * SFC_{eff} * P_{eff}}{f_i * f_c * f_l * Capacity * Vref * f_w} \quad (1.7)$$

Στη συνέχεια, αφού υπολογισθεί η τιμή του EEDI για κάθε ένα από αυτά τα πλοία, θα θεωρηθεί ότι εφαρμόζονται τα τεχνικά μέτρα που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Ο EEDI θα υπολογισθεί εκ νέου, αλλάζοντας τους παράγοντες εκείνους που επηρεάζονται εφαρμόζοντας το κάθε μέτρο. Αναμένεται ότι θεωρητικά ο δείκτης θα είναι βελτιωμένος. Σκοπός είναι να παρουσιαστεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας στον οποίο θα φαίνεται κατά ποιο ποσοστό η εφαρμογή ενός μέτρου στο αντίστοιχο πλοίο οδηγεί σε μείωση των εκπομπών ρύπων CO₂ αλλά και συγχρόνως να φαίνεται πώς η εφαρμογή του ίδιου μέτρου έχει διαφορετική επιρροή ανάλογα με τον τύπου του πλοίου.

3.2 EEDI Vessel 1-Tanker

Το πρώτο πλοίο που θα εξεταστεί είναι ένα τάνκερ χωρητικότητας 159.000dwt. Τα στοιχεία του πλοίου που απαιτούνται για τον υπολογισμό του δείκτη EEDI, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1 και προέρχονται από τα σχετικά αρχεία του πλοίου.

Γενικά στοιχεία

Συνολικό μήκος	274,17	m
Μήκος LBP	263,596	m
Πλάτος	48,00	m
Βύθισμα	23,10	m
Summer load line draught	17,150	m
Χωρητικότητα DWT	158566	t
Χωρητικότητα LWT	25231	t

Κύρια Μηχανή	
Κατασκευαστής	HHI-Engine & Machinery Division
Τύπος	HYUNDAI - B&W 5G70ME C9.5
Ισχύς MCR	14520kW x 73.8rpm
Ειδική κατανάλωση SFC 75%MCR	167,47 g/kWh
Καύσιμο	MDO
Ηλεκτρομηχανές	
Κατασκευαστής	HHI-Engine & Machinery Division
Τύπος	7H21/32
Ισχύς MCR	1200kW x 900rpm
Ειδική κατανάλωση SFC 50%MCR	203,858 g/kWh
Καύσιμο	MDO
Πλήθος	3
P_{AE}	613kW
Ταχύτητα	
Ταχύτητα πλοίου στο 75%MCR	14.30 knots
P_{PTI}	0
P_{Aeff}	0
P_{eff}	0
Παράγοντες διόρθωσης	
f_i	1
f_j	1
f_c	1
f_j	1,013
f_w	1

Πίνακας 3-1:Στοιχεία Vessel 1-Tanker.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που ακολουθεί και για τιμές του a και c όπως παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα για tankers, δηλαδή $a=1218.80$ και $c=0.488$ προκύπτει η τιμή του απαιτούμενου EEDI (required).

$$\text{Required EEDI} = a * \text{Capacity}^{-c}$$

$$\text{Required EEDI} = 1218.90 * 158566^{-0.488} = 3.18 \quad (\text{MEPC62/6/4(2011.7 with 10\% reduction)} \quad (3.1)$$

Στη συνέχεια, η εξίσωση του EEDI σε συνδυασμό με τα στοιχεία που δίνονται στον προηγούμενο πίνακα δίνουν την πραγματική τιμή του δείκτη.

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi}) + C_{FAE} * SFC_{AE} * P_{AE}}{f_i * f_c * f_l * Capacity * Vref * f_w} +$$

$$\frac{((\prod_{j=1}^M f_j * \sum_{i=1}^n P_{PTIi} - \sum_{i=1}^n f_{eff} P_{AEffi}) * C_{FAE} * SFC_{AE}) - \sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{Feff} * SFC_{eff} * P_{eff}}{f_i * f_c * f_l * Capacity * Vref * f_w} =$$

$$\frac{(3.206 * 10890 * 167.4) + (3.206 * 613 * 203.8)}{158566 * 1.013 * 14.3} = 2.72 \text{ gr CO}_2/\text{kWh} \quad (3.2)$$

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 3-2.

Required EEDI (MEPC62/6/4(2011.7 with 10% reduction)	3.18 g CO₂/tonne*mile
Attained EEDI	2.72 g CO₂/tonne*mile

Πίνακας 3-2: Τιμές Required EEDI και Attained EEDI για Vessel 1.

3.3 EEDI Vessel 2-Containership

Στη συνέχεια εξετάζεται ένα containership χωρητικότητας 5.000TEU. Τα στοιχεία του πλοίου που απαιτούνται για τον υπολογισμό του δείκτη EEDI, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3 και προέρχονται από τα σχετικά αρχεία του πλοίου.

Γενικά στοιχεία

Συνολικό μήκος	255,49 m
Μήκος LBP	242,022 m
Πλάτος	37,40 m
Βύθισμα	22,10 m
Summer load line draught	13,50 m
Χωρητικότητα DWT	62603 t
Χωρητικότητα 70% DWT	43822 t
Χωρητικότητα LWT	19373 t

Κύρια Μηχανή

Κατασκευαστής	HHI-Engine & Machinery Division
Τύπος	HYUNDAI - B&W 6G80ME C9.2
Ισχύς MCR	24800kW x 72.0rpm
Ειδική κατανάλωση SFC 75%MCR	165,09 g/kWh
Καύσιμο	MDO

Ηλεκτρομηχανές

Κατασκευαστής	HHI-Engine & Machinery Division
Τύπος	6H25/33

Ισχύς MCR	1890kW x 900rpm
Ειδική κατανάλωση SFC 50%MCR	196.53 g/kWh
Καύσιμο	MDO
Πλήθος	4
P _{AE}	870kW
Ταχύτητα	
Ταχύτητα πλοίου στο 75%MCR	21.68 knots
P _{PΤΙ}	0
P _{AEeff}	0
P _{eff}	0
Παράγοντες διόρθωσης	
f _i	1
f _j	1
f _c	1
f _l	1
f _w	1

Πίνακας 3-3:Στοιχεία Vesssel 2-Containership

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που ακολουθεί και για τιμές του a και c όπως παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα για containership, δηλαδή a=174.22 και c=0.201 προκύπτει η τιμή του απαιτούμενου EEDI (required).

$$\text{Required EEDI} = \alpha * \text{Capacity}^{-c}$$

$$\text{Required EEDI} = 174.22 * 43822^{-0.201} = 18.92 \text{ gr CO}_2/\text{kWh} \text{ (MEPC62/6/4(2011.7 with 10\% reduction)} \quad (3.3)$$

Στη συνέχεια, η εξίσωση του EEDI σε συνδυασμό με τα στοιχεία που δίνονται στον προηγούμενο πίνακα δίνουν την πραγματική τιμή του δείκτη.

$$\begin{aligned} \text{EEDI} = & \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi}) + C_{FAE} * SFC_{AE} * P_{AE}}{f_i * f_c * f_l * \text{Capacity} * V_{ref} * f_w} + \\ & \frac{((\prod_{j=1}^M f_j * \sum_{i=1}^n P_{PTIi} - \sum_{i=1}^n f_{eff} P_{AE} f_{fi}) * C_{FAE} * SFC_{AE}) - \sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{F_{eff}} * SFC_{eff} * P_{eff}}{f_i * f_c * f_l * \text{Capacity} * V_{ref} * f_w} = \\ & \frac{(3.206 * 18600 * 165.1) + (3.206 * 870 * 196.5)}{43822 * 21.68 * 1} = 10.94 \text{ gr CO}_2/\text{kWh} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 3-4.

Required EEDI (MEPC62/6/4(2011.7 with 10% reduction)	18.92 g CO2/tonne*mile
Attained EEDI	10.94 g CO2/tonne*mile

Πίνακας 3-4: Τιμές Required EEDI και Attained EEDI για Vessel 2.

3.4 EEDI Vessel 3-Bulk carrier

Τέλος εξετάζεται ένα πλοίο μεταφοράς ξηρού φορτίου, bulk carrier χωρητικότητας 63500DWT. Τα στοιχεία του πλοίου που απαιτούνται για τον υπολογισμό του δείκτη EEDI, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα και προέρχονται από τα σχετικά αρχεία του πλοίου.

Γενικά στοιχεία	
Συνολικό μήκος	199,99 m
Μήκος LBP	193,74 m
Πλάτος	32,26 m
Βύθισμα	18,50 m
Summer load line draught	13,30 m
Χωρητικότητα DWT	62.657 t
Χωρητικότητα LWT	12.265 t
Κύρια Μηχανή	
Κατασκευαστής	DOOSAN ENGINE Co Ltd
Τύπος	MAN B&W 5S60ME C8.2 Tier II
Ισχύς MCR	8300kW x 91.0rpm
Ειδική κατανάλωση SFC 75%MCR	166 g/kW
Καύσιμο	MDO
Ηλεκτρομηχανές	
Κατασκευαστής	DOOSAN ENGINE Co Ltd
Τύπος	5123/30
Ισχύς MCR	650kW x 720rpm
Ειδική κατανάλωση SFC 50%MCR	205.85 g/kWh
Καύσιμο	MDO
Πλήθος	3
P _{AE}	415kW
Ταχύτητα	
Ταχύτητα πλοίου στο 75%MCR	14.12 knots
P _{PTI}	0
P _{AEff}	0
P _{eff}	0

Παράγοντες διόρθωσης	
f _i	1
f _j	1
f _c	1.0157
f _l	1
f _w	1

Πίνακας 3-5: Στοιχεία Vessel 3-Bulk Carrier.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που ακολουθεί και για τιμές του α και c όπως παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα για bulk carrier, δηλαδή $\alpha=961.79$ και $c=0.477$ προκύπτει η τιμή του απαιτούμενου EEDI (required).

$$\text{Required EEDI} = \alpha * \text{Capacity}^{-c}$$

$$\text{Required EEDI} = 961.79 * 62657^{-0.477} = 4.95 \text{ gr CO}_2/\text{kWh} \text{ (MEPC62/6/4(2011.7 with 0\% reduction) (3.5)}$$

Στη συνέχεια, η εξίσωση του EEDI σε συνδυασμό με τα στοιχεία που δίνονται στον προηγούμενο πίνακα δίνουν την πραγματική τιμή του δείκτη.

$$\text{EEDI} = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} * SFC_{MEi} * P_{MEi}) + C_{FAE} * SFC_{AE} * P_{AE}}{f_i * f_c * f_l * \text{Capacity} * V_{ref} * f_w} +$$

$$\frac{((\prod_{j=1}^M f_j * \sum_{i=1}^n P_{PTi} - \sum_{i=1}^n f_{eff} P_{AEff_i}) * C_{FAE} * SFC_{AE}) - \sum_{eff=1}^N f_{eff} * C_{F_{eff}} * SFC_{eff} * P_{eff}}{f_i * f_c * f_l * \text{Capacity} * V_{ref} * f_w} =$$

$$\frac{(3.206 * 6225 * 166) + (3.206 * 415 * 205.86)}{62657 * 14.12 * 1.0157} = 3.99 \text{ gr CO}_2/\text{kWh} \quad (3.6)$$

Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 3-6.

Required EEDI (MEPC62/6/4(2011.7 with 0% reduction)	4.95 g CO₂/tonne*mile
Attained EEDI	3.99 g CO₂/tonne*mile

Πίνακας 3-6:: Τιμές Required EEDI και Attained EEDI για Vessel 3.

3.5 Εφαρμογή Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας από τα Καυσαέρια

Στο σημείο αυτό θα θεωρηθεί ότι στα πλοία εγκαθίσταται Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας από τα Καυσαέρια της Κύριας Μηχανής, το οποίο οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώνοντας το φορτίο που απαιτείται να καλυφθεί από τις ηλεκτρογεννήτριες.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι εφαρμογής αυτού του συστήματος καθένα από τους οποίους προσέφερε και διαφορετικό ποσοστό ανάκτησης της ενέργειας από την Κύρια Μηχανή. Υπενθυμίζουμε:

- PTG-Power Turbine Generator 3-5% της Κύριας Μηχανής.
- STG-Steam Turbine Generator 5-8% της Κύριας Μηχανής.
- ST-PT Steam Turbine-Power Turbine 8-11% της Κύριας Μηχανής.

Η ενέργεια που ανακτάται χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού άρα στην εξίσωση του EEDI ο όρος που επηρεάζεται είναι ο P_{Aeff} . Πλέον, στις δοκιμές που θα γίνουν, ο όρος αυτός δεν θα είναι μηδενικός αλλά θα εκφράζεται σαν ποσοστό της ισχύος της Κύριας Μηχανής του κάθε πλοίου. Για να παρουσιασθεί καλύτερα το πόσο η εφαρμογή του Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας επηρεάζει την τιμή του EEDI, θα θεωρηθεί ότι για κάθε πλοίο εφαρμόζεται κάθε φορά και άλλη τεχνολογία με διαφορετικό ποσοστό ανάκτησης. Επίσης θεωρείται ότι, αν και τα ποσοστά ανάκτησης δίνονται για λειτουργία υπό πλήρες φορτίο, το ίδιο ποσοστό ισχύει και στο 75% του MCR που χρησιμοποιείται στην εξίσωση υπολογισμού του EEDI.

Οι δοκιμές για τα τρία είδη πλοίων που έχουν αναφερθεί θα αφορούν εφαρμογή:

- PTG-Power Turbine Generator με ανάκτηση 4% της Κύριας Μηχανής.
- STG-Steam Turbine Generator με ανάκτηση 7% της Κύριας Μηχανής.
- ST-PT Steam Turbine-Power Turbine με ανάκτηση 11% της Κύριας Μηχανής.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-7.

	Vessel 1 - Tanker			Vessel 2 – Containership			Vessel 3 – Bulk carrier		
	P_{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	P_{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	P_{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new
PTG 4%	435.6	2.72	2.59	744	10.94	10.45	249	3.99	3.81
STG 7%	762.3	2.72	2.50	1302	10.94	10.08	435.75	3.99	3.67
ST-PT 11%	1198	2.72	2.38	2046	10.94	9.58	684.75	3.99	3.49

Πίνακας 3-7: Αποτελέσματα εφαρμογής Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας

3.6 Εφαρμογή μέτρων βελτιστοποίησης σημείου λειτουργίας Κύριας Μηχανής

Είναι ξεκάθαρο ότι σε αυτό το μέτρο σκοπός είναι η μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFC) μέσω της βελτιστοποίησης του σημείου λειτουργίας της Κύριας Μηχανής. Ήδη αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο οι τρόποι που μπορεί να επιτευχθεί αυτό. Θυμίζουμε ότι η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει είτε για μερικό φορτίο (part load) στο 75% MCR είτε για χαμηλό φορτίο (low load) στο 65% MCR. Ακολουθούν συνοπτικά οι τρεις τρόποι βελτιστοποίησης και το αντίστοιχο ποσό μείωσης του SFC :

- Engine Control Tuning με μείωση 1-3 gr/kWh

- Exhaust Gas Bypass με μείωση 3-5gr/kWh
- Μεταβολή Γεωμετρίας των Turbochargers με μείωση 3-4.5gr/kWh

Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής θα θεωρηθεί ότι η βελτιστοποίηση γίνεται για συνθήκες μερικού φορτίου, δηλαδή στο 75% του MCR, που είναι και το σημείο λειτουργίας της Κύριας Μηχανής που εξετάζεται στο δείκτη EEDI. Ο όρος δηλαδή που αλλάζει στην εξίσωση του EEDI είναι ο SFC_{ME} . Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι, παρόλο που με τη βελτιστοποίηση στο 65% του φορτίου η κατανάλωση θα ήταν μικρότερη σε πραγματικές συνθήκες, ωστόσο στον υπολογισμό του δείκτη θα έπρεπε να θεωρηθεί λειτουργία στο 75% του MCR. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα της αντίστοιχης ενότητας στο κεφάλαιο 2, η κατανάλωση στο 75% του MCR για μια μηχανή βελτιστοποιημένη για 65% φορτίο, είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κατανάλωση μιας μηχανής που βελτιστοποιείται για 75% φορτίο. Άρα σε αυτή την περίπτωση θα είχαμε μικρότερη βελτίωση της τιμής του δείκτη EEDI.

Θα γίνουν και πάλι τρεις δοκιμές για κάθε είδος πλοίου που εξετάζουμε:

- μείωση 1 gr/kWh με εφαρμογή Engine Control Tuning
- μείωση 3 gr/kWh με εφαρμογή Exhaust Gas Bypass
- μείωση 5 gr/kWh, δοκιμή που εφαρμόζεται για εκπαιδευτικούς λόγους, παρόλο που καμία από τις προαναφερθείσες τεχνικές δεν πετυχαίνει τέτοια βελτίωση στο 75% του MCR.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

	Vessel 1 - Tanker			Vessel 2 – Containership			Vessel 3 – Bulk carrier		
	Νέο SFC_{ME} (gr/kWh)	EEDI old	EEDI new	Νέο SFC_{ME} (gr/kWh)	EEDI old	EEDI new	Νέο SFC_{ME} (gr/kWh)	EEDI old	EEDI new
-1 gr/kWh	166.40	2.72	2.70	164.09	10.94	10.88	165	3.99	3.97
-3 gr/kWh	164.40	2.72	2.67	162.09	10.94	10.75	163	3.99	3.93
-5 gr/kWh	162.40	2.72	2.64	160,09	10.94	10.63	161	3.99	3.88

Πίνακας 3-8: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης σημείου λειτουργίας της Κ.Μ.

3.7 Εφαρμογή μέτρων βελτιστοποίησης συνεργασίας πλοίου-προπέλας και συστήματος Air Lubrication

Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί η εφαρμογή μέτρων που βελτιώνουν τη συνεργασία πλοίου-προπέλας και συμβάλλουν στην εξοικονόμηση καυσίμου. Η εφαρμογή καθενός από τα τεχνικά μέτρα που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση του εκάστοτε πλοίου στην ίδια ταχύτητα V_{ref} , μεταφέροντας το ίδιο φορτίο απαιτώντας όμως μικρότερη ενέργεια από την Κύρια Μηχανή. Επειδή δεν είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι στην περίπτωση του δείκτη EEDI, ο όρος της εξίσωσης που επηρεάζεται είναι ο P_{ME} διότι από αυτόν υπολογίζεται η ισχύς των Ηλεκτρογεννητριών, θα θεωρηθεί ότι μια καινοτόμα τεχνολογία προσφέρει την επιπλέον ισχύ στην Κύρια Μηχανή. Η επιπλέον ισχύς υπολογίζεται ως ποσοστό της ισχύος της Κύριας Μηχανής, ποσοστό ίσο με την

εξοικονόμηση καυσίμου που υπόσχεται το κάθε μέτρο. Επειδή και η εφαρμογή συστήματος Air Lubrication έχει επίδραση στον ίδιο όρο, η εφαρμογή του θα εξετασθεί και αυτή σε αυτό το σημείο.

Υπενθυμίζονται τα μέτρα που βελτιστοποιούν τη συνεργασία πλοίου-προπέλας και η αντίστοιχη εξοικονόμηση καυσίμου που προσφέρουν:

- Pre-swirl Stator με εξοικονόμηση 4%
- Becker Mewis Duct με εξοικονόμηση 2-10%.
- Schneekluth Wake Equalizing Duct με εξοικονόμηση έως 12%
- Propeller Boss Cap Fins (PBCF) με εξοικονόμηση 3-5%
- Counter Rotating Propeller με εξοικονόμηση 10-15%

Οι δοκιμές που θα γίνουν για κάθε είδος πλοίου που εξετάζουμε είναι:

- Εξοικονόμηση 4% με εφαρμογή Pre-swirl Stator
- Εξοικονόμηση 6% με εφαρμογή Becker Mewis Duct
- Εξοικονόμηση 9% με εφαρμογή Schneekluth Wake Equalizing Duct
- Εξοικονόμηση 3% με εφαρμογή Propeller Boss Cap Fins (PBCF)
- Εξοικονόμηση 12% με εφαρμογή Counter Rotating Propeller (CRP)
- Air Lubrication με εξοικονόμηση 15% στο Tanker και 7,5% στο Containership

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-9.

	Vessel 1 - Tanker			Vessel 2 – Containership			Vessel 3 – Bulk carrier		
	ποσοστό	EEDI old	EEDI new	ποσοστό	EEDI old	EEDI new	ποσοστό	EEDI old	EEDI new
Pre-swirl Stator 4%	0.04	2.72	2.62	0.04	10.94	10.52	0.04	3.99	3.85
Becker Mewis Duct 6%	0.06	2.72	2.57	0.06	10.94	10.32	0.06	3.99	3.77
Schneekluth Wake Equalizing Duct 9%	0.09	2.72	2.49	0.09	10.94	10.01	0.09	3.99	3.66
PBCF 3%	0.03	2.72	2.64	0.03	10.94	10.63	0.03	3.99	3.88
CRP 12%	0.12	2.72	2.41	0.12	10.94	9.70	0.12	3.99	3.55
Air Lubrication	0.15	2.72	2.34	0.075	10.94	10.16	-	3.99	-

Πίνακας 3-9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης συνεργασίας πλοίου-προπέλας.

3.8 Εφαρμογή Variable Frequency Drive σε αντλίες και ανεμιστήρες

Η εφαρμογή Variable Frequency Drive σε αντλίες, ανεμιστήρες και συμπιεστές είναι μέτρο που όπως αναφέρθηκε ήδη, δίνει πολλά περιθώρια βελτίωσης στις καταναλώσεις αυτών των συσκευών. Στο σημείο αυτό θα υπενθυμίσουμε ότι το μέτρο αυτό αξίζει να εφαρμοστεί σε αντλίες και σε ανεμιστήρες που έχουν συνεχή λειτουργία και παρουσιάζουν την μεγαλύτερη κατανάλωση σε ένα πλοίο. Τέτοιες είναι οι Main Cooling Sea Water Pumps, οι Lub Oil Pumps και οι Low Temp Cooling Fresh Water Pumps από αντλίες, οι ανεμιστήρες του μηχανοστασίου και οι ανεμιστήρες και συμπιεστές του συστήματος κλιματισμού. Όλες αυτές οι συσκευές έχουν διαστασιολογηθεί και επιλεχθεί για να ανταποκρίνονται όταν η Κύρια Μηχανή λειτουργεί σε 100% φορτίο. Οι ώρες που συμβαίνει αυτό είναι ελάχιστες. Παρόλα αυτά οι ηλεκτρικοί κινητήρες των αντλιών και των ανεμιστήρων συνεχίζουν να λειτουργούν στο 100% ακόμα και όταν οι ανάγκες δεν το απαιτούν. Σημειώνεται ότι η σχέση που συνδέει την ηλεκτρική ισχύ κατανάλωσης με τις στροφές λειτουργίας είναι η 2.1:

$$\frac{P1}{P2} = \left(\frac{n1}{n2}\right)^3 \quad (2.1)$$

Σύμφωνα με την σχέση 2.1 ακόμα και μια μικρή μείωση των στροφών, μπορεί να αποφέρει σημαντικές μειώσεις στην ηλεκτρική κατανάλωση.

Σε καθένα από τα πλοία που εξετάζονται θα θεωρηθεί ότι το μέτρο αυτό εφαρμόζεται στις αντλίες Cooling Sea Water Pumps και στους ανεμιστήρες του μηχανοστασίου (E/R Supply Fans), σενάριο εφαρμογής που εξετάζεται και στην [12]. Θυμίζουμε ότι για τις αντλίες η μείωση των στροφών που επιτυγχάνεται χάρη στο VFD είναι από 10%, για λειτουργία στο 85% του MCR, έως και 30% στο 55% του MCR, δηλαδή 27-65,5% μείωση ηλεκτρικής κατανάλωσης. [12] [11] Ταυτόχρονα στους ανεμιστήρες του μηχανοστασίου η μείωση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος είναι από 62% με λειτουργία στο 75% του MCR έως και 86,5% σε συνθήκες low steaming και λειτουργία Κύριας Μηχανής στο 55% του MCR. [13]

Στα πλαίσια των δοκιμών θα θεωρηθεί ότι η Κύρια Μηχανή λειτουργεί στο 75% του MCR, όπως θεωρείται και στον υπολογισμό του EEDI. Άρα θεωρείται 20% μείωση των στροφών των αντλιών που σημαίνει 48,5% μείωση απαιτούμενης ισχύος και 62% μείωση της ισχύος των ανεμιστήρων. Η συνολική ισχύς που εξοικονομείται θα αντιστοιχεί στην τιμή του παράγοντα P_{Aeff} που χρησιμοποιείται στην εξίσωση του EEDI, θεωρώντας ότι κατά αυτό το ποσό ισχύος μειώνεται η παραγόμενη ισχύς από τις ηλεκτρογεννήτριες.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο Πίνακας 3-10 με τα δεδομένα για κάθε πλοίο που εξετάζεται. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται και ένας παράγοντας που αντικατοπτρίζει το χρονικό ποσοστό που λειτουργούν οι αντλίες και οι ανεμιστήρες.

	Ισχύς (kW)	Ποσότητα	Συντελεστής χρόνου	Συντελεστής μείωσης ισχύος	Σύνολο (kW)
Vessel 1 - Tanker					
Main Cool SW Pumps	55	3	0.666	0.485	53.3
E/R Supply Fans	18.5	4	1	0.62	45.9
Σύνολο P_{Aeff}					99.2
Vessel 2- Containership					
Main Cool SW Pumps	55	3	0.666	0.485	53.3
E/R Supply Fans	37	4	1	0.62	91.8
Σύνολο P_{Aeff}					145.1
Vessel 3- Bulk Carrier					
Main Cool SW Pumps	30.5	3	0.666	0.485	29.6
E/R Supply Fans	18.5	4	1	0.62	45.9
Σύνολο P_{Aeff}					75.5

Πίνακας 3-10: Δεδομένα αντλιών και ανεμιστήρων

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής στην εξίσωση του EEDI παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-11.

	Vessel 1 - Tanker			Vessel 2 – Containership			Vessel 3 – Bulk carrier		
	P _{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	P _{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	P _{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new
VFD	99.2	2.72	2.69	145.1	10.94	10.84	75.5	3.99	3.94

Πίνακας 3-11: Αποτελέσματα εφαρμογής VFD.

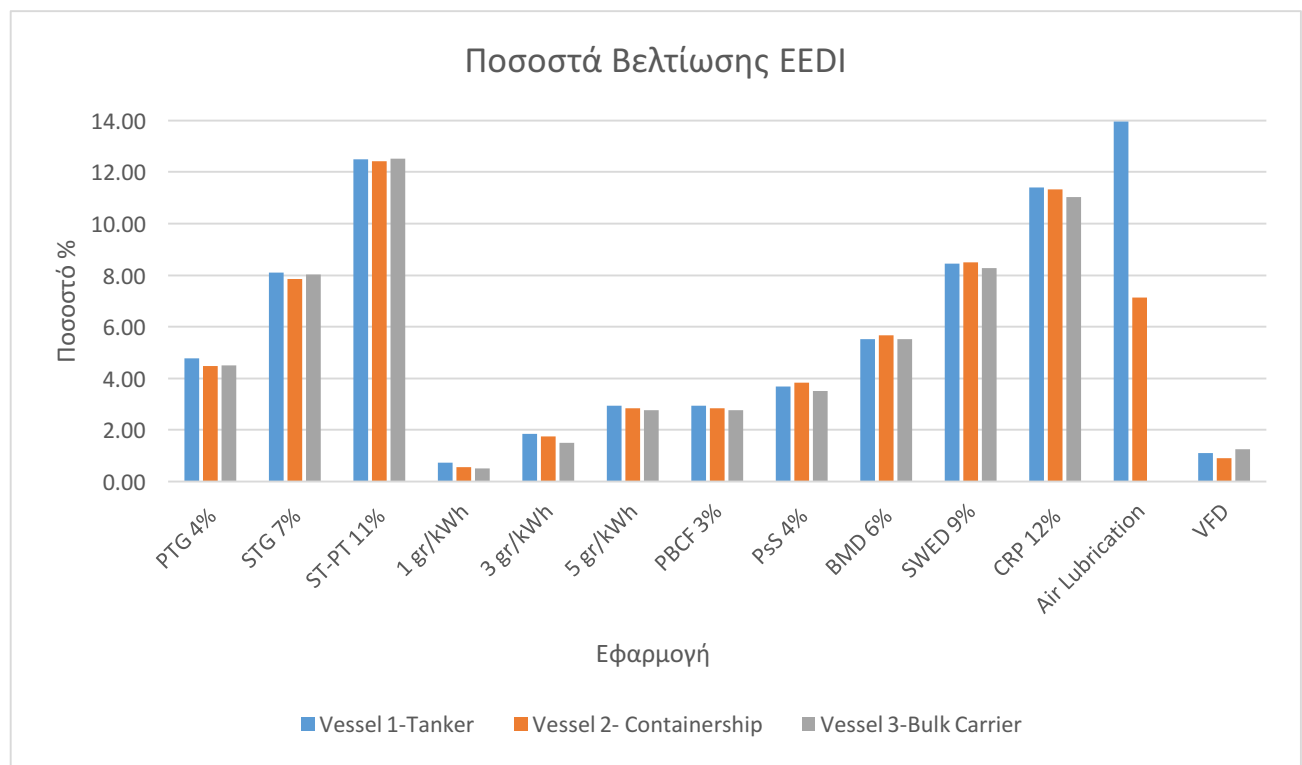
3.9 Αποτελέσματα

Στο σημείο αυτό θα ξαναπαρουσιαστούν, συγκεντρωτικά αυτή τη φορά, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των τεσσάρων τεχνικών μέτρων. Επίσης προστέθηκαν στήλες παρουσιάζοντας την ποσοστιαία μεταβολή της τιμής του EEDI, Δ_{EEDI} (%) έπειτα από την εφαρμογή του κάθε μέτρου. Με πράσινο χρώμα παρουσιάζονται οι τιμές με την μεγαλύτερη ποσοστιαία βελτίωση που παρουσιάζει το κάθε μέτρο στα τρία είδη πλοίου.

	Vessel 1 - Tanker				Vessel 2 - Containership				Vessel 3 – Bulk carrier			
Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας	P _{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	P _{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	P _{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)
PTG 4%	435.6	2.72	2.59	-4.78	744	10.94	10.45	-4.48	249	3.99	3.81	-4.51
STG 7%	762.3	2.72	2.5	-8.09	1302	10.94	10.08	-7.86	435.75	3.99	3.67	-8.02
ST-PT 11%	1198	2.72	2.38	-12.50	2046	10.94	9.58	-12.43	684.75	3.99	3.49	-12.53
Βελτιστοποίηση Κύριας Μηχανής	Νέο SFC _{ME} (gr/kWh)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	Νέο SFC _{ME} (gr/kWh)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	Νέο SFC _{ME} (gr/kWh)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)
-1 gr/kWh	166.40	2.72	2.7	-0.74	164.09	10.94	10.88	-0.55	165	3.99	3.97	-0.50
-3 gr/kWh	164.40	2.72	2.67	-1.84	162.09	10.94	10.75	-1.74	163	3.99	3.93	-1.50
-5 gr/kWh	162.40	2.72	2.64	-2.94	160.09	10.94	10.63	-2.83	161	3.99	3.88	-2.76

Βελτιστοποίηση συνεργασίας πλοίου- προπέλας	ποσοστό	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	ποσοστό	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	ποσοστό	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)
Pre-swirl Stator 4%	0.04	2.72	2.62	-3.68	0.04	10.94	10.52	-3.84	0.04	3.99	3.85	-3.51
Becker Mewis Duct 6%	0.06	2.72	2.57	-5.51	0.06	10.94	10.32	-5.67	0.06	3.99	3.77	-5.51
Schneekluth Wake Equalizing Duct 9%	0.09	2.72	2.49	-8.46	0.09	10.94	10.01	-8.50	0.09	3.99	3.66	-8.27
PBCF 3%	0.03	2.72	2.64	-2.94	0.03	10.94	10.63	-2.83	0.03	3.99	3.88	-2.76
CRP 12%	0.12	2.72	2.41	-11.40	0.12	10.94	9.7	-11.33	0.12	3.99	3.55	-11.03
Air Lubrication	0.15	2.72	2.34	-13.97	0.075	10.94	10.16	-7.13	-	3.99	-	-
Εφαρμογή VFD	P_{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	P_{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)	P_{Aeff} (kW)	EEDI old	EEDI new	Δ_{EEDI} (%)
VFD	99.2	2.72	2.69	-1.10	145.1	10.94	10.84	-0.91	75.5	3.99	3.94	-1.25

Πίνακας 3-12: Συγκενρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής μέτρων.

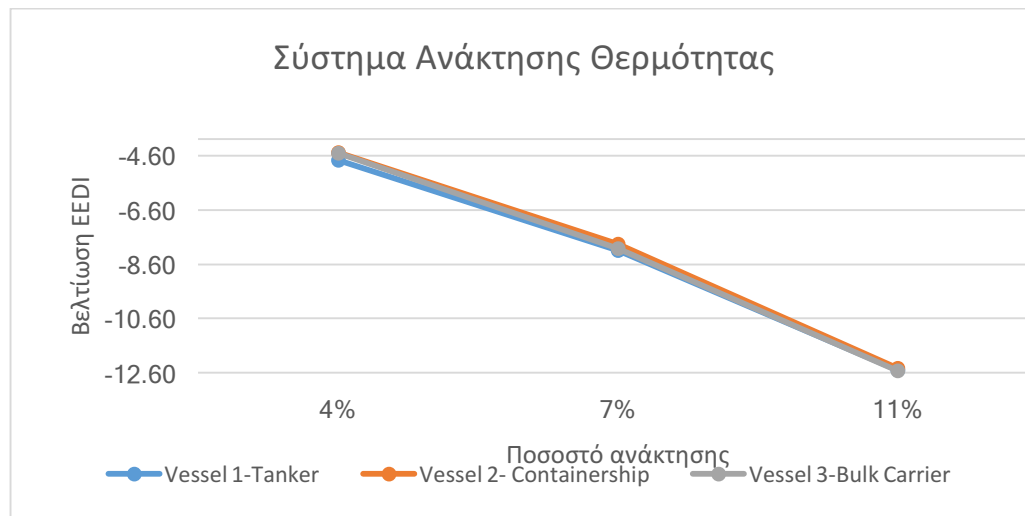


Διάγραμμα 3-1: Συγκενρωτικά ποσοστά βελτίωσης EEDI.

3.10 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας είναι μέτρο που στοχεύει στην ανάκτηση ενέργειας εκμεταλλευόμενο τη θερμότητα των καυσαερίων της Κύριας Μηχανής. Είδαμε ότι ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής που θα επιλεγεί, ανακτάται και διαφορετικό ποσοστό ενέργειας. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται πώς το ποσοστό ανάκτησης που επιτυγχάνεται αντιστοιχεί ελαφρώς

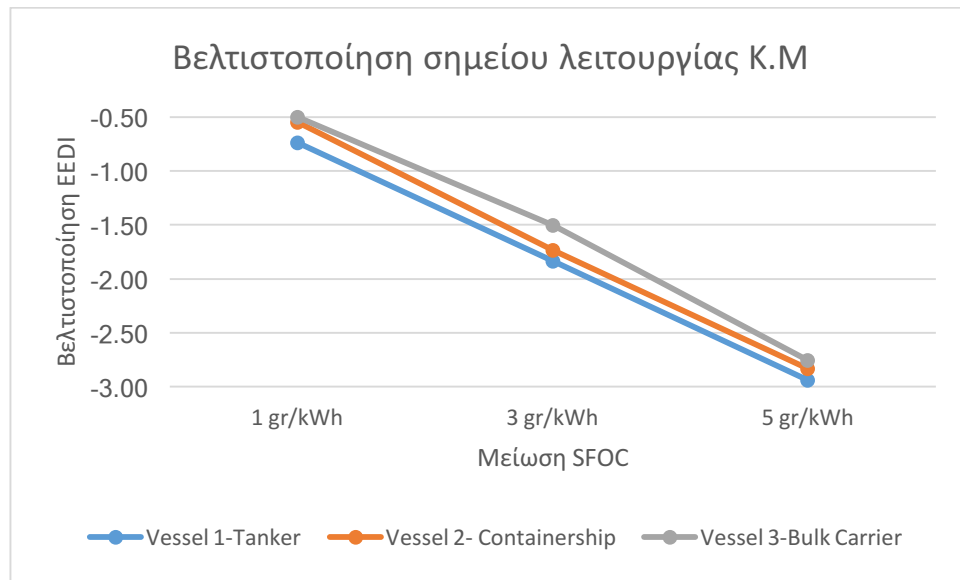
αυξημένο και στο ποσοστό που μειώνεται η τιμή του EEDI. Συγκεκριμένα εφαρμόζοντας σύστημα με PTG-Power Turbine Generator που προσφέρει ανάκτηση 4%, ο EEDI παρουσιάζει μείωση από 4.48 έως 4.78% ανάλογα με τον τύπο πλοίου, με καλύτερα αποτελέσματα να έχει το Tanker της δοκιμής. Αντίστοιχα, στην περίπτωση του Steam Turbine Generator με ανάκτηση 7%, η μείωση στον EEDI των τριών πλοίων κυμαίνεται από 7.86-8,09%. Και πάλι το Tanker παρουσιάζει τη μεγαλύτερη βελτίωση. Στην περίπτωση όμως που η εφαρμογή γίνεται με τον συνδυασμό ST-PT Steam Turbine - Power Turbine με 11% ανάκτηση τότε ο δείκτης EEDI του Bulk Carrier βελτιώνεται περισσότερο συγκριτικά με τα άλλα δύο πλοία, με το ποσοστό βελτίωσης να είναι 12.53%. Το Διάγραμμα 3-2 παρουσιάζει την βελτίωση του EEDI συγκριτικά με το ποσοστό ανάκτησης θερμότητας. Παρατηρείται ότι και στα τρία πλοία που εξετάζονται, ο τρόπος μεταβολής είναι όμοιος.



Διάγραμμα 3-2: Ποσοστό μείωσης EEDI με εφαρμογή Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας.

Όσον αφορά στην Βελτιστοποίηση του Σημείου Λειτουργίας της Κύριας Μηχανής ώστε να παρουσιάζει μικρότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) παρατηρείται ότι το Tanker της δοκιμής παρουσιάζει τη μεγαλύτερη βελτίωση στον EEDI σε σύγκριση με τα άλλα δύο πλοία της δοκιμής, παρόλο που η αρχική ειδική κατανάλωσή του είναι μεγαλύτερη. Βέβαια φαίνεται πως η βελτίωση του δείκτη είναι οριακά καλύτερη από τα άλλα δύο πλοία. Στην καλύτερη περίπτωση, όταν δηλαδή βελτιώνεται η ειδική κατανάλωση κατά 3 gr/kWh, ο EEDI του Tanker έχει βελτιωθεί κατά 1,84% τη στιγμή που ο αντίστοιχος του Containership είναι 1,74% και του Bulk Carrier 1,50%. Όταν η βελτίωση είναι μόλις 1 gr/kWh τότε όλοι οι δείκτες παρουσιάζουν μείωση μικρότερης του 1%, θυμίζουμε όμως ότι αυτή η βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί χωρίς καμία επέμβαση στη μηχανή, μόνο με Engine Control Tuning, κάτι που στις σύγχρονες ηλεκτρονικές μηχανές είναι εύκολη διαδικασία. Η θεωρητική περίπτωση της βελτίωσης 5 gr/kWh παρουσιάζει αξιόλογα αποτελέσματα μείωσης του EEDI σε ποσοστό οριακά μικρότερο του 3%. Όπως ειπώθηκε όμως και στο Κεφάλαιο 2, κανένας τρόπος δεν επιτυγχάνει αυτή τη μείωση, για λειτουργία στο 75% του MCR όπου υπολογίζεται ο δείκτης EEDI. Σαν γενικό συμπέρασμα με βάση τα παραπάνω εξάγεται το ότι αυτό το μέτρο

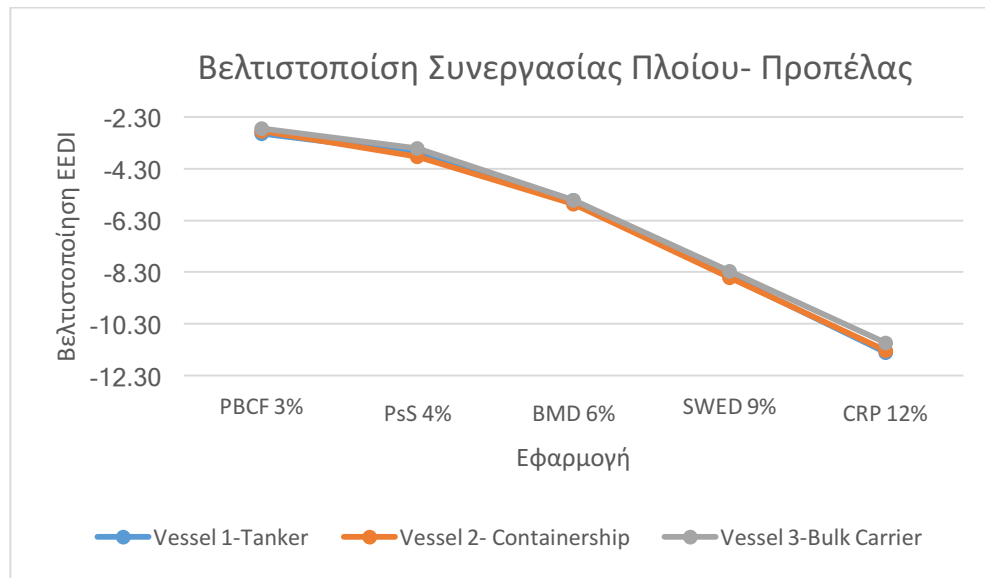
συμφέρει να εφαρμοσθεί σε μηχανές που παρουσιάζουν υψηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου. Εκεί τα περιθώρια βελτίωσης είναι μεγαλύτερα. Το Διάγραμμα 3-3 παρουσιάζει τον τρόπο μεταβολής του EEDI κάθε πλοίου ανάλογα με τα gr/kWh βελτίωσης της ειδικής κατανάλωσης. Παρατηρείται ότι Tanker και Bulk Carrier έχουν σχεδόν παράλληλη μεταβολή μεταξύ 1-3 gr/kWh ενώ η μεταβολή στο Containership είναι πιο απότομη.



Διάγραμμα 3-3: Ποσοστό μείωσης EEDI βελτιστοποιώντας το σημείο λειτουργίας της K.M.

Κατά την εφαρμογή μέτρων Βελτιστοποίησης Συνεργασίας Πλοίου – Προπέλας παρατηρείται το εξής: η τιμή του δείκτη EEDI για το Containership της δοκιμής είναι αυτή που βελτιώνεται περισσότερο σε σχέση με τα άλλα δύο πλοία στις περισσότερες περιπτώσεις. Η μεγάλη τιμή του δείκτη αυτού του πλοίου, που κατά κύριο λόγο οφείλεται στον όρο της εξίσωσης στον οποίο μετέχει η τιμή της ισχύος της Κύριας Μηχανής, φαίνεται επηρεάζεται σημαντικά όταν μειώνεται η ισχύς αυτή. Εξαιρεση στο παραπάνω αποτελούν οι εφαρμογές με το μικρότερο και το μεγαλύτερο ποσοστό εξοικονόμησης, δηλαδή η Propeller Boss Cap Fin και η Counter Rotating Propeller, στα οποία το Tanker της δοκιμής παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, με το Pre swirl Stator, το οποίο προσφέρει 4% εξοικονόμηση, η βελτιστοποίηση του EEDI για το Containership είναι στο 3,84%. Παρουσιάζεται δηλαδή σχεδόν αναλογία. Αντίστοιχα η τιμή του EEDI για το Tanker μειώνεται 3,68% ενώ του Bulk Carrier 3,51%. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή του Becker Mewis Duct, με εξοικονόμηση καυσίμου 6%. Το Tanker και το Bulk Carrier παρουσιάζουν ακριβώς το ίδιο ποσοστό βελτίωσης του EEDI, 5,51%. Αξιοσημείωτο επίσης είναι και το γεγονός ότι με την εφαρμογή Propeller Boss Cap Fin στο Tanker της δοκιμής, η εξοικονόμηση 3% που υπόσχεται στα καύσιμα, μεταφέρεται σχεδόν ακριβώς και στον EEDI, ο οποίος βελτιώνεται κατά 2,94%. Γενικά όμως, και στα τρία πλοία, η μείωση του EEDI είναι οριακά μικρότερη από το ποσοστό βελτίωσης που υπόσχεται κάθε επεμβατικό μέτρο. Μπορεί να ειπωθεί όμως, ότι το Bulk Carrier ωφελείται πάντοτε λιγότερο από την εφαρμογή τέτοιου είδους μέτρων. Παρουσιάζεται και πάλι ένα διάγραμμα,

το Διάγραμμα 3-4 στο οποίο φαίνεται η μεταβολή του δείκτη EEDI ανάλογα με το μέτρο που εφαρμόζεται. Το γεγονός ότι υπάρχει σχεδόν πλήρης εξάρτηση ανάμεσα στο ποσοστό βελτίωσης της τιμής του EEDI σε σχέση με τη βελτίωση που υπόσχεται το κάθε μέτρο, οδηγεί ουσιαστικά στο σχηματισμό όμοιων καμπυλών μεταξύ των πλοίων.



Διάγραμμα 3-4: Ποσοστό μείωσης EEDI βελτιστοποιώντας τη συνεργασία πλοίου-προπέλας.

Τελειώνοντας τον σχολιασμό για κάθε επί μέρους μέτρο, αν και η εφαρμογή VFD σε αντλίες και ανεμιστήρες προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που όπως είδαμε μπορεί να φτάνει και στο 60% στις καταναλώσεις αυτών των συσκευών, ωστόσο αυτό δεν αποτυπώνεται και στον δείκτη EEDI των τριών πλοίων που εξετάστηκαν. Η μείωση του δείκτη κυμαίνεται από 0,9% στο Containership έως 1,25% στο Bulk Carrier και είναι λογικό γιατί η εφαρμογή του μέτρου έγινε μόνο στις Cooling Sea Water Pumps και στους Supply Fans του μηχανοστασίου. Το ποσό δηλαδή της ισχύος στην οποία εφαρμόστηκε το μέτρο αυτό, συμμετέχει πολύ λίγο στην εξίσωση του EEDI. Βέβαια υπάρχει και η άλλη οπτική, από την οποία τα αποτελέσματα της εφαρμογής VFD είναι εντυπωσιακά. Στο Tanker της δοκιμής, η ισχύς που εξοικονομείται είναι 99,2kW, περίπου το 0,9% της ισχύος της Κύριας Μηχανής. Η βελτίωση όμως του δείκτη για αυτό το πλοίο είναι 1,10%! Το ίδιο και στο Containership. 0,78% της Κύριας Μηχανής εξοικονόμηση, με βελτίωση 0,9% στον EEDI ενώ στο Bulk Carrier τα αντίστοιχα νούμερα είναι 1,2% και 1.25%. Αν εφαρμοστεί και σε άλλα σημεία του πλοίου όπως στις αντλίες λίπανσης Lub Oil Pumps ή στο σύστημα κλιματισμού, τότε τα οφέλη θα είναι πολλαπλάσια και η επίδραση στην τιμή του EEDI θα είναι μεγαλύτερη. Παρόλα αυτά όμως, το γεγονός ότι η λειτουργία ακόμα και μόνο αυτών των αντλιών και ανεμιστήρων είναι συνεχής οδηγεί στο ότι τα τελικά ποσά ενέργειας που εξοικονομούνται είναι σημαντικά. Επίσης, το φθινό κόστος εφαρμογής αυτό του μέτρου το κάνει να συγκαταλέγεται στις πιο συμφέρουσες προτάσεις εξοικονόμησης ενέργειας με πολύ σύντομο χρόνο απόσβεσης όπως εξηγείται στην παράγραφο 2.4.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση ανάμεσα σε δύο μέτρα που υπόσχονται ίδιο ποσοστό εξοικονόμησης. Για παράδειγμα η εφαρμογή Συστήματος Ανάκτησης Θερμότητας με PT-Power Turbine τεχνολογία συγκριτικά με την εφαρμογή Pre swirl Stator εξοικονομούν το 4% της ενέργειας της Κύριας Μηχανής. Όμως, η επίδραση στον δείκτη EEDI είναι σαφώς μεγαλύτερη για το Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας, από 4.48 έως 4.78 στα τρία πλοία, την ώρα που η βελτίωση του EEDI με το Pre swirl Stator κυμαίνεται κάτω από το 4%. Το ίδιο ισχύει και με την εφαρμογή του VFD, όπως εξηγήθηκε. Ο λόγος είναι απλός και οφείλεται στο ότι με το Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας ή το VFD, η ενέργεια αυτή εξοικονομείται από το ποσό που θα έπρεπε σε άλλη περίπτωση να καλυφθεί από τις Ηλεκτρογεννήτριες, οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου, σε σχέση με την Κύρια Μηχανή, από την οποία εξοικονομείται ενέργεια για την πρόωση χάρη στο Pre swirl Stator. Από αυτό μπορεί να βγει εύκολα το συμπέρασμα ότι μέτρα τα οποία συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας που προορίζεται για ηλεκτροπαραγωγή, είναι πιο αποτελεσματικά στη βελτίωση του EEDI.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκαν οι δυνατότητες βελτίωσης της ενεργειακής υπογραφής ενός πλοίου, του δείκτη EEDI δηλαδή, μέσω της εφαρμογής τεχνικών μέτρων που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Από τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης συνάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα τόσο για τον ίδιο τον δείκτη, όσο και για την αποτελεσματικότητα των μέτρων ως προς την βελτίωσή του.

Αρχικά πρέπει να τονιστεί ότι ο δείκτης EEDI εκφράζει την αποδοτικότητα του σχεδιασμού ενός πλοίου όσον αφορά στις εκπομπές ρύπων και όπως αναφέρθηκε διαφέρει πολύ από την πραγματική συμπεριφορά του πλοίου κατά τη λειτουργία του. Αυτό οφείλεται αφενός στο ότι όροι του EEDI όπως η ισχύς και η κατανάλωση της Κύριας Μηχανής και των Ηλεκτρογεννητριών λαμβάνονται ως σταθεροί, κάτι που δεν συμβαίνει κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού και αφετέρου στο ότι η επίδραση των καιρικών συνθηκών δεν αποτυπώνεται πλήρως στην εξίσωση του EEDI, παρόλο που υπάρχει η πρόβλεψη με τον παράγοντα f_w . Είναι πολύ δύσκολο μέχρι στιγμής να αποτυπωθεί με μαθηματικό τρόπο η επίδραση του καιρού, του ύψους των κυμάτων και των ρευμάτων και να εισαχθεί στην εξίσωση. Βέβαια, η επίδρασή των καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού είναι σημαντική όσον αφορά στην κατανάλωση και άρα και στους ρύπους. Φυσικά, η τιμή του EEDI είναι ένα σημαντικό στοιχείο στο να αντιληφθεί κάποιος το πόσο ενεργειακά αποδοτικά σχεδιάστηκε να λειτουργεί ένα πλοίο.

Όσον αφορά στα τεχνικά μέτρα που βελτιστοποιούν την τιμή του δείκτη, εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι όλα τα μέτρα βελτιστοποιούν τον δείκτη. Τα μέτρα τα οποία συνεισφέρουν στην μείωση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης, δηλαδή η μείωση της ειδικής κατανάλωσης της Κύριας Μηχανής αλλά και οι επεμβάσεις στο hull του πλοίου και στην προπέλα, βελτιστοποιούν τον δείκτη κατά ένα ποσοστό οριακά μικρότερο του ποσοστού μείωσης ισχύος που υπόσχονται. Αντιθέτως, τα μέτρα που συνεισφέρουν στην ηλεκτροπαραγωγή ή μειώνουν την ηλεκτρική κατανάλωση κάποιων συσκευών, τέτοια είναι το Σύστημα Ανάκτησης Θερμότητας και το VFD, οδηγούν σε βελτίωση της τιμής του EEDI λίγο μεγαλύτερη από την εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν. Οπότε, ανάμεσα σε δύο μέτρα ισοδύναμα ενεργειακά, καλό είναι να επιλεγεί εκείνο που θα οδηγήσει σε μειωμένη χρήση των Ηλεκτρογεννητριών, αν σκοπός είναι η μεγαλύτερη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

Επίσης, ακόμα ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί, είναι ότι ο τύπος πλοίου δεν διαφοροποιεί σημαντικά την επίδραση που έχει το κάθε μέτρο στην τιμή του δείκτη. Κάθε μέτρο του οποίου η εφαρμογή δοκιμάστηκε, βελτιώνει την τιμή του δείκτη κατά το ίδιο ποσοστό, ή με πολύ μικρή διαφορά και στα τρία πλοία της δοκιμής. Δεν μπορεί να ειπωθεί δηλαδή ότι κάποιο μέτρο είναι καταλληλότερο να εφαρμοσθεί σε συγκεκριμένο τύπο πλοίου και όχι σε άλλον. Μπορεί όμως να ειπωθεί ότι η βελτιστοποίηση του σημείου λειτουργίας της Κύριας Μηχανής έχει καλύτερα

αποτελέσματα σε μηχανές με μεγάλη ειδική κατανάλωση. Η περίπτωση του Tanker που έχει τη μηχανή με την μεγαλύτερη ειδική κατανάλωση, είναι η μόνη περίπτωση που σε όλες τις δοκιμές εφαρμογής αυτού του μέτρου παρουσίαζε σταθερά τα καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τους άλλους δύο τύπους πλοίου.

Αναφορικά με τις προοπτικές εξέλιξης αυτής της εργασίας, σε περίπτωση που υπάρχει πρόσβαση σε τέτοια στοιχεία, θα άξιζε να παρουσιαστεί μια σύγκριση των τιμών του EEDI για τα συγκεκριμένα πλοία της δοκιμής, με τις αντίστοιχες τιμές του EEOI για να δειχθεί αν τελικά η αποδοτικότητα του σχεδιασμού μεταφράζεται και σε αποδοτικότητα κατά τη λειτουργία του πλοίου. Για αυτή τη σύγκριση απαιτούνται στοιχεία καταναλώσεων καυσίμου κατά τη διάρκεια ταξιδιών, στοιχεία που για τα πλοία της δοκιμής δεν ήταν δυνατόν να αποκτηθούν.

Μεγάλο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε επίσης η οικονομική μελέτη εφαρμογής αυτών των μέτρων. Κάθε μέτρο που αναφέρθηκε οδηγεί σε εξοικονόμηση καυσίμων και βελτίωση του δείκτη EEDI. Όμως, αυτό που τελικά αποτελεί κριτήριο των κατασκευαστών ή πλοιοκτητών για την επιλογή εφαρμογής του ενός έναντι του άλλου, είναι η αξία της επένδυσης, δηλαδή το οικονομικό όφελος εφαρμογής του. Δυστυχώς η προστασία του περιβάλλοντος δεν είναι ακόμα πρώτη προτεραιότητα. Αντιθέτως, δεν θα προτιμηθεί ποτέ ένα μέτρο, όση βελτίωση και αν επιτυγχάνει στον EEDI, αν έχει πολύ μεγάλο χρόνο απόσβεσης των κεφαλαίων που θα χρησιμοποιηθούν. Θα ήταν πολύ χρήσιμο να διευκρινιστεί ποιο μέτρο μεταξύ ενεργειακά ισοδύναμων αξίζει οικονομικά να εφαρμοσθεί και ποιο όχι. Επίσης ενδιαφέρον έχει η προσέγγιση αυτή να γίνει όχι μόνο για το αρχικό κόστος εφαρμογής, αλλά και για τη δυσκολία κατασκευής, το χρόνο που απαιτείται, την συντήρηση του νέου εξοπλισμού και φυσικά να ληφθούν υπόψη τα δεδομένα της αγοράς όπως η τιμή των καυσίμων και τα ναύλα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. Α. Πάγκαλος, *"Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index EEDI) Ανασκόπηση Εξέλιξης Διεθνών Κανονισμών, Σχεδιαστικά Και Επιχειρησιακά Μέτρα, Παραδείγματα Εφαρμογής"*, Αθήνα, Ιούνιος 2011.
- [2] S. M. R. HASAN, *"Impact of EEDI on Ship Design and Hydrodynamics, A Study of the Energy Efficiency Design Index and Other Related Emission Control Indexes"*, 2011.
- [3] IMO, *"Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines"*, London, January 2016.
- [4] R. W. B. Joel R. Pérez Ossesa, *"On the impact of marine engineering efficiency with de-rated engines: A study using VLCCs"*, London, 2013.
- [5] MEPC.245(66), *"2014 Guidelines On The Method Of Calculation Of The Attained Energy Efficiency Design Index (Eedi) For New Ships"*, ANNEX 5, International Maritime Organization, 4 April 2014.
- [6] MEPC 62/6/4, *"Consideration And Adoption Of Amendments To Mandatory Instruments"*, International Maritime Organization, 10 January 2011.
- [7] MAN Diesel. & Turbo, *"Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption"*, Denmark, Aug 2014.
- [8] Georgios A. Livanos, Gerasimos Theotokatos, Dimitrios-Nikolaos Pagonis, *"Techno-Economical Investigation Of Alternative Propulsion Concepts Of Ferries Operating In Mediterranean Sea"*, September 2012.
- [9] ABB, *"Using Variable Frequency Drives (VFD) to save energy and reduce emissions in newbuilds and existing ships"*, 2012.
- [10] ABB, *"Energy Efficiency Guide, The other alternative fuel"*, 2013.
- [11] Spyridon V. Giannoutsos, Stefanos N. Manias, *"A Data-Driven Process Controller for Energy-Efficient Variable-Speed Pump Operation in the Central Cooling Water System of Marine Vessels"*, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 62, No. 1, Jan 2015.
- [12] Spyridon V. Giannoutsos, Stefanos N. Manias, *"Energy Management and D/G Fuel Consumption Optimization in the Power System of Marine Vessels through VFD-based Process Flow Control"*, 2015.
- [13] Spyridon V. Giannoutsos, Stefanos N. Manias, *"Improving Engine Room Ventilation Systems"*, IEEE Industry Applications Magazine, Sep 2016.

- [14] MAN Diesel. & Turbo, "*SFOC Optimisation Methods for MAN B&W Two-stroke IMO Tier II Engines*", Sep 2010.
- [15] Lambos Maritime Services, "*Marine Efficiency Systems at "Slow Steaming" Conditions*", Sep 2013.
- [16] R. A. Toppol, "*The Efficiency of a Mewis Duct in Waves*", Norwegian University of Science and Technology, June 2013.
- [17] [http://www.pbcf.jp/..](http://www.pbcf.jp/)
- [18] J. P. Winkler, "*Air Cavity System*", DK Group, 2006.