



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής

&

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ**

Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»**

ΤΙΤΛΟΣ

***Βελτιστοποίηση Αποδοτικότητας Πλοίου. Παράμετροι Σχεδιασμού
και Πλου***

ΤΙΤΛΟΣ ΑΓΓΛΙΚΑ

Design and Operational parameters for ship Efficiency Optimization

Όνοματεπώνυμο Φοιτητή:

Βλασταρίδης Αλέξανδρος

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

Τσουκαλάς Βασίλειος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Τσουκαλάς Βασίλειος

Παπουτσιδάκης Μιχαήλ

Δρόσος Χρήστος

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αλέξανδρος Βλασταρίδης του Πολυχρόνη, με αριθμό μητρώου 8066283 φοιτητής του Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο δηλών

Αλέξανδρος Βλασταρίδης



Ημερομηνία

09/04/2024

ΤΙΤΛΟΣ

Βελτιστοποίηση Αποδοτικότητας Πλοίου. Παράμετροι Σχεδιασμού και Πλου

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Βλασταρίδης Αλέξανδρος

**Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική
εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του
Διϋδρματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες
στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος
Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου
Δυτικής Αττικής.**

Περίληψη

Στην σύγχρονη εποχή, στο προσκήνιο βρίσκονται τα θέματα περιορισμού της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών βλαβερών αερίων από τις ανθρώπινες βιομηχανικές και εμπορικές δραστηριότητες. Η εμπορική Ναυτιλία ως κυρίαρχος στην διακίνηση αγαθών, είναι ο πρώτος κλάδος που αποφασίζεται επισήμως και σε παγκόσμιο επίπεδο να θεσπιστούν όρια στην κατανάλωση καυσίμου και στις εκπομπές αερίων. Έτσι, η επιστημονική κοινότητα αλλά και οι εμπλεκόμενοι στις θαλάσσιες μεταφορές, καλούνται να βρουν άμεσα λύσεις ώστε να εισαχθούν αποδοτικότερα πλοία στην αγορά και να βελτιωθούν τα υπάρχοντα ώστε να μπορούν να συμμορφώνονται με τους κανονισμούς και τα επιτρεπτά όρια.

Αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι να παρουσιαστούν και να αξιολογηθούν οι επικρατέστερες μέθοδοι βελτιστοποίησης πλοίου όσον αφορά τον Σχεδιασμό του αλλά και τον Πλου. Η προσέγγιση ξεκινά από την αποτίμηση της σημερινής κατάστασης στην Ναυτιλία, η οποία, έχοντας ανακάμψει στην μετά Covid εποχή, καλείται να ανταπεξέλθει στην αυξανόμενη ζήτηση για θαλάσσιες μεταφορές και ταυτόχρονα να συμμορφώνεται με του διεθνείς κανονισμούς ασφαλείας και προστασίας του περιβάλλοντος.

Στην συνέχεια γίνεται ενδελεχής μελέτη στους δείκτες αποδοτικότητας που έχουν θεσπιστεί από τον IMO, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον διαχωρισμό των σχεδιαστικών και των λειτουργικών δεικτών αλλά και το τι εκφράζει ο καθένας. Κύριο ζήτημα είναι η αναζήτηση τρόπων με τους οποίους το σύγχρονο πλοίο θα μπορεί να κρατάει αυτούς τους δείκτες κάτω από τα όρια που έχουν τεθεί μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου αλλά και τις εκπομπές βλαβερών αερίων από τις ναυτιλιακές δραστηριότητες. Το ζητούμενο είναι να αναδειχθούν οι πλέον κατάλληλοι αλλά και από οικονομοτεχνικής άποψης πιο βιώσιμοι τρόποι βελτιστοποίησης του σχεδιασμού και του πλου των συγχρόνων πλοίων με απώτερο σκοπό να επιτευκτεί το μεγάλο όραμα της πλήρους απεξάρτησης της Ναυτιλίας από τον άνθρακα μέσα στον τρέχοντα αιώνα.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
1. Εισαγωγή.....	10
1.1 Η κατάσταση στην Ναυτιλία σήμερα	11
1.2 Η προβλέψεις για το μέλλον της Ναυτιλίας.	13
2. Παράμετροι Βελτιστοποίησης Σχεδιασμού Πλοίου.....	16
2.1 Τα Αέρια Θερμοκηπίου και ο Διεθνής οργανισμός Ναυτιλίας.....	16
2.2 Ο Σχεδιαστικός Δείκτης EEDI.....	20
2.2.1 Ο Υπολογισμός του EEDI.....	21
2.2.2 Η μείωση των επιπέδων αναφοράς του EEDI	24
2.3 Τα εναλλακτικά καύσιμα ως τρόπος μείωσης του EEDI.....	27
2.3.1 Το LNG και το μέλλον του στην Ναυτιλία.....	29
2.3.2 Carbon-free Εναλλακτικά Καύσιμα και Συμπεράσματα	31
2.4 Συνδυασμός Πλοίου-Μηχανής-Προπέλας και EEDI.....	33
2.5 Ο δείκτης EEXI.....	35
2.5.1 Η μέθοδος EPL ως εργαλείο συμμόρφωσης με τον EEXI.....	38
2.6 Η Ηλεκτροπρόωση ως μέσο για αποδοτικότερα πλοία.	41
2.6.1 Σχεδιαστικά Πλεονεκτήματα Ηλεκτροπρόωσης	43
2.6.2 Μειονεκτήματα Ηλεκτροπρόωσης.....	45
3. Παράμετροι Βελτιστοποίησης Πλου	49
3.1 Ο Δείκτης CII.....	49
3.2 Ο δείκτης EEOI	53
3.3 Ανάλυση του SEEMP	55
3.4 Τα κυριότερα Ενεργειακά μέτρα Βελτιστοποίησης Πλου	58
3.4.1 Υπολογισμός Βέλτιστης Διαδρομής (Route Planning)	58
3.4.2 Βελτιστοποίηση ταχύτητας (Speed Optimization)	60
3.4.3 Βελτιστοποίηση κατάσταση πλοίου.....	64
4. Συμπεράσματα / Επίλογος.....	66
Βιβλιογραφία	69

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Το ποσοστό ανάπτυξης των θαλάσσιων μεταφορών το 2023 και η πρόβλεψη για το 2024 (UNCTAD,2023)	12
Εικόνα 2 Η αύξηση της μέσης διανυσθείσας απόστασης ανά είδος φορτίου (UNCTAD,2023).....	12
Εικόνα 3 Οι προβλέψεις για τους τόνους CO ₂ από την Ναυτιλία έως το 2050 (Bouman, et.al 2017).....	14
Εικόνα 4 Η οργανωτική δομή του IMO (Psarafis & Kontovas 2020).....	18
Εικόνα 5 Η απόκλιση των στόχων του IMO με τα σενάρια BAU (Joung et.al,2020).....	20
Εικόνα 6 Οι τιμές του παράγοντα μείωσης για τους βασικούς τύπους πλοίων (Ren et.al., 2019).....	25
Εικόνα 7 Οι τιμές των παραμέτρων a,b και c ανάλογα με τον τύπο πλοίου (IMO,2011)	26
Εικόνα 8 Τα όρια κάθε φάσης του EEDI για τα Container Ships (Vladimir,et.al, 2017).	27
Εικόνα 9 Οι συντελεστές μετατροπής των συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων (Tokuslu & Gazioğlu, 2020).....	29
Εικόνα 10 Τα σενάρια χρήσης LNG στο μέλλον (Englert et.al, 2021).....	30
Εικόνα 11 Η μείωση κατά 22% του Carbon Intensity από το 2008 και ο στόχος του 2030	36
Εικόνα 12 Περιπτώσεις επιτυχούς και μη επιτυχούς συμμόρφωσης με τα όρια του EEXI (ClassNK, 2021)	37
Εικόνα 13 Η εφαρμογή ενός μηχανικού συστήματος EPL (IMO,2021)	39
Εικόνα 14 Σενάριο χρήσης EPL και τα αποτελέσματα στην τιμή του EEXI.....	40

Εικόνα 15 Η πορεία της εφαρμογής του EEXI από το 2021 έως σήμερα (ClassNK, 2021).....	41
Εικόνα 16 Διάταξη συμβατικής (Αριστερά) και ηλεκτρικής (Δεξιά) πρόωσης (Nguyen, et.al. 2020).....	42
Εικόνα 17 Η καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου μιας μηχανής ντίζελ ανάλογα το ποσοστό φόρτισης (Tran, 2016)	44
Εικόνα 18 Το μονογραμμικό διάγραμμα της διαδρομής της Ισχύος από την γεννήτρια στον κινητήρα πρόωσης	46
Εικόνα 19 Οι τιμές των παραγόντων a και c ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου (IMO, 2019).....	51
Εικόνα 20 Οι συγκρίσεις του Attained CII με τα όρια των επιπέδων (Sun, et.al 2023)..	51
Εικόνα 21 Τα επίπεδα του CII (Zincir, 2023).....	52
Εικόνα 22 Η πορεία του rating ενός πλοίου που διατηρεί το ίδιο Attained CII (Wang et al. 2021).....	53
Εικόνα 23 Οι φάσεις του SEEMP (Krmek et. al 2021)	57
Εικόνα 24 Οι επιλογές για την ιδανική διαδρομή ταξιδιού από λογισμικό (Lou et.al, 2015).....	60
Εικόνα 25 Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου από την εφαρμογή του Slow Streaming (Daginis & Nikitakos, 2015).....	62
Εικόνα 26 Παράδειγμα μείωσης της ταχύτητας κατά την διάρκεια ταξιδιού (Li et.al, 2020).....	63
Εικόνα 27 Η επιπλέον ισχύς πρόωσης που απαιτείται λόγω ρύπανσης στην γάστρα (Hou, 2017).....	64

Σύντομογραφίες

BAU = Business as Usual

CI = Carbon Intensity Indicator

CO₂ = Carbon Dioxide

DWT = Dead Weight Tonnage

ECA = Emission Controlled Areas

GT = Gross Tonnage

GHG = Green House Gas

ICCT = International Council on Clean Transportation

IEEC = International Energy Efficiency Certificate

EEDI = Energy Efficiency Desing Index

EEOI = Energy Efficiency Operation Index

EEXI = Energy Efficiency Existing Ship Index

EPL = Engine Power Limitation

HFO = Heavy Fuel Oil

IMO = International Maritime Organization

LNG = Liquefied Natural Gas

MARPOL = Maritime Agreement Regarding Oil Pollution

MCR = Maximum Continuous Rate

MEPC = Marine Environment Protection Committee

GHG = Greenhouse Gas

SEEMP = Ship Energy Efficiency Management Plan

SFC = Specific Fuel Consumption

UNCTAD = United Nations Conference on Trade and Development.

1. Εισαγωγή

Η σύγχρονη εποχή επιβάλλει στην βιομηχανία την ανάγκη μεγιστοποίησης της αποδοτικότητας, με την έννοια ότι τόσο ο σχεδιασμός όσο και η παραγωγή των προϊόντων και των υπηρεσιών πρέπει να διέπονται από οικονομική αλλά και περιβαλλοντολογική βιωσιμότητα. Ειδικά για την δεύτερη, τα νομικά πλαίσια γίνονται όλο και στενότερα και πληθαίνουν οι κανονισμοί που υπάγονται οι διαδικασίες παραγωγής και λειτουργίας όλων των βιομηχανικών κλάδων, καθώς έχουν διαπιστωθεί εδώ και δεκαετίες οι περιβαλλοντολογικοί κίνδυνοι που δημιουργεί η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση του σύγχρονου ανθρώπου για προϊόντα και ενέργεια.

Ο κλάδος των μεταφορών δεν θα μπορούσε να αποτελεί εξαίρεση της παραπάνω διατύπωσης, πόσο μάλλον ο κλάδος των θαλάσσιων μεταφορών, που ως ο αποδοτικότερος τρόπος μεταφοράς είναι εκείνος που αναλαμβάνει το συντριπτικό ποσοστό έναντι των αερομεταφορών και των μεταφορών ξηράς. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με ανασκοπικές έρευνες (Bouman,2017), το 80% της παγκόσμιας μεταφοράς προϊόντων γίνεται μέσω θαλάσσης, και αυτό το ποσοστό φτάνει ως το 90% σε αναπτυσσόμενες χώρες που έχουν ελλιπές οδικό δίκτυο και μη ανεπτυγμένα αεροδρόμια. Αυτό απαιτεί την κατανάλωση τεράστιων ποσών καυσίμου κάθε χρόνο, που μεταφράζεται αντίστοιχα σε εκπομπή βλαβερών αερίων και μόλυνση του περιβάλλοντος.

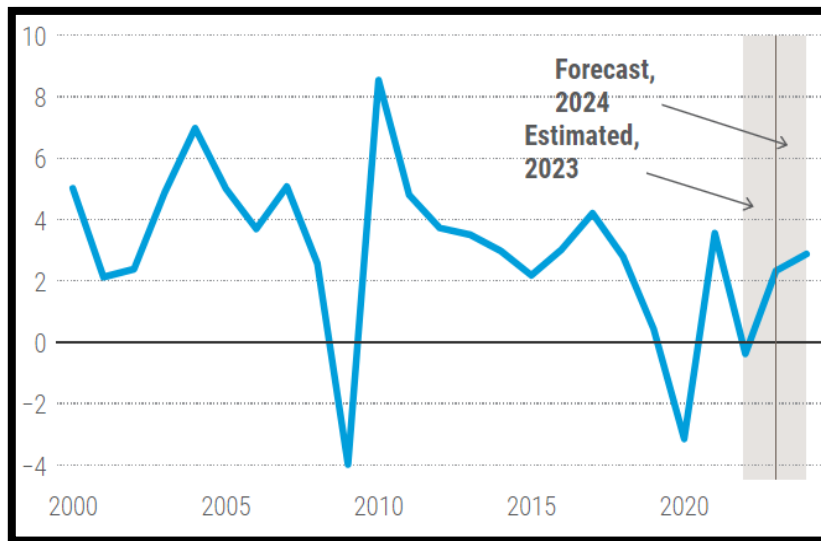
Τα αέρια που περισσότερο έχουν απασχολήσει τους παγκόσμιους οργανισμούς και τους έχουν αναγκάσει να ασκούν έλεγχο και να εισάγουν όρια εκπομπών, κατηγοριοποιούνται ως Αέρια του Θερμοκηπίου (Green House Gases- εξής GHG), με τα πιο σημαντικά από αυτά να είναι το Διοξείδιο του Άνθρακα (Εξής CO₂), ο υδρατμός (H₂O), το μεθάνιο (CH₄), το οξείδιο του αζώτου (N₂O), και το όζον (O₃) και άλλα. Για να τεθούν τα ερευνητικά πλαίσια σχετικά με την Ναυτιλία και τα GHG θα πρέπει να γίνει μία αποτίμηση της σημερινής κατάστασης που επικρατεί στην Ναυτιλία.

1.1 Η κατάσταση στην Ναυτιλία σήμερα

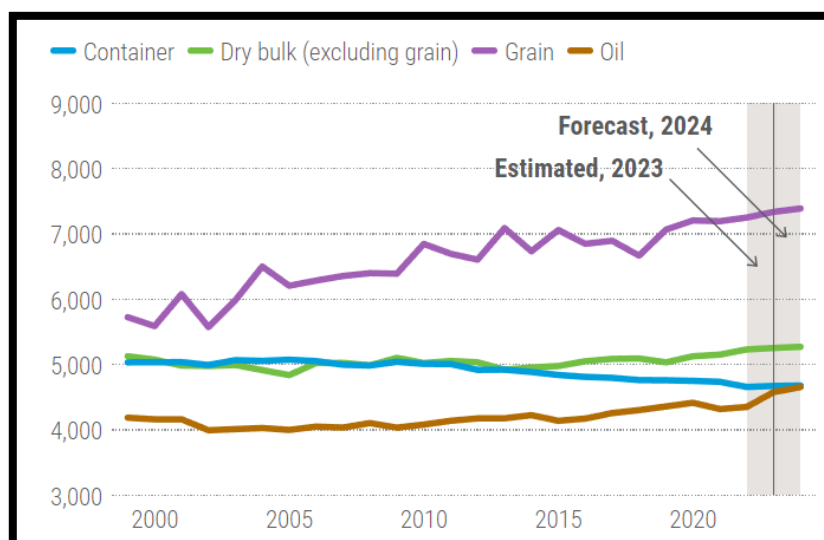
Αρχικά όταν μιλάμε για το σήμερα, αναφερόμαστε εσχάτως στην μετά-Covid εποχή, όπου σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία της πλαισιωμένης από τον ΟΗΕ Διάσκεψης για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη (United Nations Conference on Trade and Development - UNCTAD), παρατηρείται ανάκαμψη της ανάπτυξης των θαλάσσιων μεταφορών κατά 2% (UNCTAD,2023). Μάλιστα όπως φαίνεται από την Εικόνα 1, οι ρυθμοί αυτοί της ανάκαμψης προβλέπεται να συνεχιστούν και το 2024, ενώ άλλες έρευνες (Ammar & Seddiek, 2020) εικάζουν ότι θα συνεχιστεί και μέχρι το 2028.

Παράλληλα με την ανάκαμψη των θαλάσσιων μεταφορών παρατηρείται αύξηση στον μέσο όρο αποστάσεων που καλούνται να διανύσουν τα πλοία της εμπορικής Ναυτιλίας για την μεταφορά διαφόρων ειδών φορτίων από το λιμάνι απόπλου προς το λιμάνι προορισμού. Η αιτία αυτού του φαινομένου έχει βραχυπρόθεσμες αιτίες όπως για παράδειγμα ο πόλεμος στην Ουκρανία ή μεσοπρόθεσμες όπως η ανάπτυξη χωρών της Αφρικής και της Ασίας που ακολουθείται από αύξηση της ζήτησης προϊόντων από τις χώρες αυτές. Απόδειξη αυτού είναι το γράφημα της Εικόνας 2, όπου η UNCTAD έχει απεικονίσει την αύξηση των μιλίων που διανύονται από πλοία μεταφοράς καυσίμων, container, σιτηρών και άλλων χύδην φορτίων. Στο εν λόγω γράφημα ξεχωρίζει η κατά 20% αυξημένη διανυσθείσα απόσταση για μεταφορά σιτηρών που είναι αποτέλεσμα της ασταθούς γεωπολιτικής κατάστασης της Ουκρανίας.

Παρόλα αυτά οι μέσοι όροι αποστάσεων για μεταφορά άλλων χύδην φορτίων και καυσίμων είναι και αυτοί αυξημένοι, ως αποτέλεσμα της διασποράς της ζήτησης που όπως ειπώθηκε παραπάνω είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης χωρών εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης και Βορείου Αμερικής.



Εικόνα 1 Το ποσοστό ανάπτυξης των θαλάσσιων μεταφορών το 2023 και η πρόβλεψη για το 2024 (UNCTAD,2023)



Εικόνα 2 Η αύξηση της μέσης διανυσθείσας απόστασης ανά είδος φορτίου (UNCTAD,2023)

Σαν γενική φάση λοιπόν θα λέγαμε ότι η Ναυτιλία έχει αυξημένη ζήτηση τόσο σε tonnage όσο και σε αποστάσεις που πρέπει να καλύψει σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια. Υπάρχει φυσικά η απόλυτα λογική επαγωγική σχέση μεταξύ της αύξησης της ζήτησης θαλάσσιων μεταφορών με την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων, η οποία με την σειρά της είναι αλληλένδετη με την αύξηση της περιβαλλοντολογικής μόλυνσης.

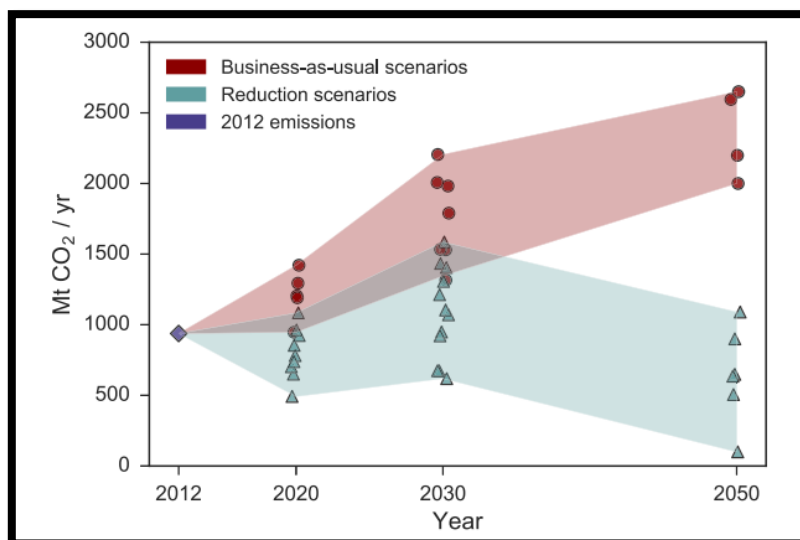
Ο κόσμος ακόμη και σήμερα, παρόλο τις προσπάθειες ένταξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εναλλακτικών καυσίμων, βασίζεται κατά 80% σε ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας που απαιτείται παγκοσμίως (Isikli et.al, 2020). Παρόμοια ποσοστά όπως είναι προφανές σημειώνονται και στον κλάδο της Ναυτιλίας, με αποτέλεσμα οι εκπομπές αερίων από τις θαλάσσιες μεταφορές να είναι ιδιαίτερα υψηλές και απειλητικές για το περιβάλλον.

Συγκεκριμένα στον κλάδο της Παγκόσμιας Ναυτιλίας αποδίδεται το 3.1% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ κατά μέσο όρο από το 2008 έως και σήμερα, ποσοστό που ισοδυναμεί με τις αντίστοιχες εκπομπές μιας πλήρους βιομηχανοποιημένης χώρας όπως η Γερμανία. Το ποσοστό καθαυτό δεν είναι αυτό που εμπνέει την ανησυχία, αντίθετα με την καθολική πρόβλεψη πως λόγω της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησης και αλλά και της ανάπτυξης περισσότερων χωρών, το ποσοστό αυτό της ναυτιλίας δύναται να αυξηθεί από 50 έως 250% έως το 2050. Με άλλα λόγια, έχει διαπιστωθεί πως με τη δεδομένη αποδοτικότητα των πλοίων, το ποσοστό εκπομπών GHG από τις θαλάσσιες μεταφορές μπορεί να εκτοξευθεί στο 10.5% τα επόμενα 30 χρόνια (Joung et.al,2020).

1.2 Η προβλέψεις για το μέλλον της Ναυτιλίας.

Στην παραπάνω διαπίστωση φαίνεται να συμφωνεί η πλειοψηφία των ερευνητών και των οργανισμών σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση των Bouman et.al, (2017). Ένα από τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας ήταν το συγκεντρωτικό γράφημα της Εικόνας 3 στο οποίο με βάση τους 962 εκατομμύρια τόνους CO₂ προερχόμενους από θαλάσσιες δραστηριότητες για το έτος 2012 αποτυπώνονται οι προβλέψεις διαφόρων ερευνών για τα επόμενα χρόνια έως το 2050 με σενάρια BAU και σενάρια μείωσης των εκπομπών λόγω τήρησης μέτρων περιορισμού εκπομπών. Όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 3, επιβεβαιώνεται ο ισχυρισμός για ως και 250% αύξηση των εκπομπών CO₂ αν οι Ναυτιλιακές ακολουθήσουν ακριβώς τις ίδιες πρακτικές και στρατηγικές. Αντίθετα, και όπως φαίνεται από το εν λόγω γράφημα, οι ερευνητές στην πλειοψηφία τους είναι αισιόδοξοι ότι παρόλο που βραχυπρόθεσμα (έως το 2030) δεν θα υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη διαφορά, σε χρονικό ορίζοντα 30ετίας,

και λόγω της εφαρμογής πρακτικών που θα αυξήσουν την αποδοτικότητα των πλοίων, οι συνολικές εκπομπές CO₂ θα είναι ίδιες ή και χαμηλότερες από αυτές του 2012, παρά την αύξηση της ζήτησης.



Εικόνα 3 Οι προβλέψεις για τους τόνους CO₂ από την Ναυτιλία έως το 2050 (Bouman, et.al 2017)

Το ποιες είναι αυτές οι πρακτικές αύξησης αποδοτικότητας των πλοίων είναι ακριβώς αυτό που θα παρουσιαστεί στις παρακάτω ενότητες. Αναλυτικά, θα παρουσιαστούν οι κανονισμοί που θέτουν οι επίσημοι θεσμοί σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου και των εκπομπών βλαβερών αερίων, και τα όρια που οι πλοιοκτήτες είναι υποχρεωμένοι να τηρούν κατά την λειτουργία των πλοίων τους.

Ο κύριος άξονας των παρακάτω κεφαλαίων είναι ο διαχωρισμός των παραμέτρων αύξησης αποδοτικότητας των πλοίων σε παραμέτρους σχεδιασμού και παραμέτρους πλου και η διεξοδική ανάλυσή τους. Με άλλα λόγια θα παρουσιαστεί ο τρόπος που εφαρμόζονται οι καινούριες τεχνολογίες και οι νέες πρακτικές στα υπάρχοντα και στα νεότευκτα πλοία τόσο στο στάδιο σχεδιασμού και ναυπήγησης τους όσο και στην καθημερινή τους λειτουργία και πλεύση.

Θα αναλυθεί από την σκοπιά του μηχανικού η τεχνοοικονομική προσέγγιση αυτών των παραμέτρων και θα αποδειχθεί ότι ο μόνος τρόπος ώστε να γίνει βιώσιμη η εξυπηρέτηση της διαρκώς αυξανόμενης ζήτησής μας για θαλάσσιες μεταφορές, είναι

η τήρηση των κανονισμών και η διαρκής βελτιστοποίηση των συστημάτων του πλοίου. Επιπρόσθετα, θα αναφερθούν τα προβλήματα και τα κενά που υπάρχουν στην ισχύουσα νομοθεσία και τους δείκτες αποδοτικότητας καθώς και το πως ο κόσμος της Ναυτιλίας αντιδρά στους κανονισμούς που επιβάλλονται.

Αναφορικά, θα παρουσιαστούν οι θεσμοθετημένοι δείκτες αποδοτικότητας των πλοίων, που αφορούν την σχεδίαση, όπως οι δείκτες EEDI και EEXI, αλλά και τον πλου, όπως ο δείκτης EEOI και CII. Παράλληλα θα αναλυθούν οι τρόποι και οι πρακτικές που θα πρέπει να ακολουθηθούν ώστε τα σύγχρονα πλοία να συμμορφώνονται με τα επιτρεπτά όρια των προαναφερθέντων δεικτών.

2. Παράμετροι Βελτιστοποίησης Σχεδιασμού Πλοίου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι παράμετροι βελτιστοποίησης της αποδοτικότητας των πλοίων σε θέματα που αφορούν τον σχεδιασμό τους. Αρχικά θα γίνει αναφορά στους θεσμούς που θέτουν τους κανονισμούς και τα όρια εκπομπών βλαβερών αερίων από τα πλοία. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι σχεδιαστικοί δείκτες αποδοτικότητας των πλοίων και θα αναλυθεί το πως βελτιστοποιούνται τα πλοία ώστε να συμμορφώνονται με τα νόμιμα όρια των δεικτών αυτών. Με άλλα λόγια, θα γίνει εκτεταμένη ανάλυση στο πως οι εφαρμογές της τεχνολογίας στα πλοία και η εξέλιξη των συστημάτων τους θα οδηγήσουν στην βελτίωση των δεικτών αποδοτικότητας τους ώστε να καταστήσουν την λειτουργία τους βιώσιμη για στο μέλλον και ασφαλή για το περιβάλλον.

Για να γίνει κατανοητό το ζήτημα της ανάγκης αύξησης της αποδοτικότητας των πλοίων ώστε να μολύνουν λιγότερο το περιβάλλον, θα πρέπει πρώτα να εξεταστούν ποια είναι τα επικίνδυνα αέρια που παράγονται από τις Ναυτιλιακές δραστηριότητες και ποιος οργανισμός θέτει τους κανονισμούς σχετικά με τον περιορισμό αυτών των βλαβερών αερίων.

2.1 Τα Αέρια Θερμοκηπίου και ο Διεθνής οργανισμός Ναυτιλίας

Η κλιματική αλλαγή και η υπερθέρμανση του πλανήτη ως αποτέλεσμα των ανθρώπινων βιομηχανικών δραστηριοτήτων είναι ένα ζήτημα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα για πολλά χρόνια. Στην περιβόητη συνθήκη του Κιότο το 1997, αναγνωρίστηκαν τα 6 πιο επικίνδυνα και πιο καθοριστικά για το φαινόμενο του θερμοκηπίου αέρια. Αναφορικά είναι τα CO₂ (Διοξείδιο του Άνθρακα, CH₄ (Μεθάνιο), N₂O (Οξείδιο του αζώτου), HFCs (Υδροφθοράνθρακες, PFCs (Perfluorochemicals) και SF₆ (εξαφθοριούχο θείο), με τα πρώτα 3 να είναι αυτά για τα οποία είναι υπεύθυνες οι μηχανές εσωτερικής καύσης όπως αυτές που χρησιμοποιούν τα πλοία (Chen et.al, 2019).

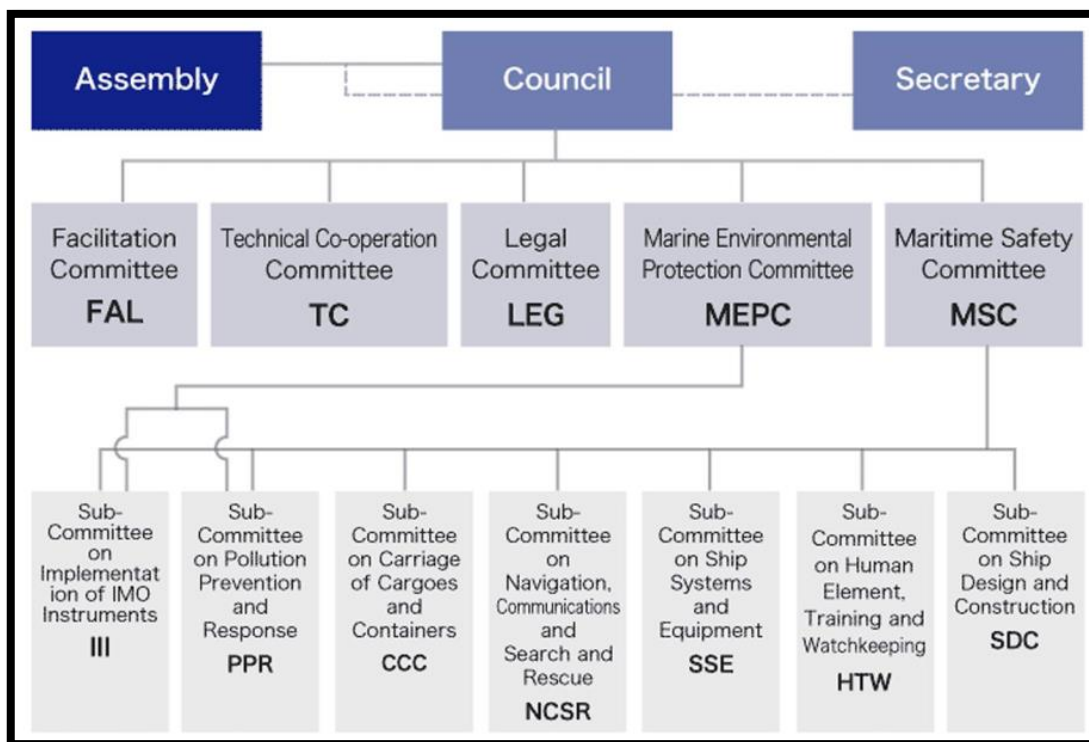
Πιο συγκεκριμένα, μόνο του το CO₂ είναι υπεύθυνο για το 30% του φαινομένου του θερμοκηπίου και δικαίως θεωρείται το πιο επικίνδυνο αέριο, για αυτό όπως θα δούμε παρακάτω η πλειοψηφία των επίσημων κανονισμών περιορισμού εκπομπών αερίου αφορούν μόνο το CO₂. Φυσικά δεν είναι το μόνο βλαβερό, καθώς το CH₄ συμβάλει πολύ καθοριστικά στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, ενώ το N₂O παραμένει στην ατμόσφαιρα της Γης για έως και 150 χρόνια προτού να εξαλειφθεί. Μάλιστα, γενικότερα τα οξείδια του Αζώτου (NO_x) θεωρούνται ιδιαίτερα βλαβερά μακροπρόθεσμα για το περιβάλλον και πλέον απασχολούν ιδιαίτερα, καθώς παράγονται από την αντίδραση του Αζώτου που εμπεριέχεται στο καύσιμο των μηχανών εσωτερικής καύσης και του Οξυγόνου στο εσωτερικό της μηχανής.

Αντιθέτως το οξείδιο του Θείου (SO_x) έχει λιγότερη διάρκεια ζωής και μάλιστα συνεισφέρει στην διατήρηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, παρόλα αυτά κατηγοριοποιείται πλέον και αυτό ως επικίνδυνο αέριο το οποίο προκαλεί οξίνιση του εδάφους και του νερού βλάπτοντας έτσι το οικοσύστημα. Η αύξηση των εκπομπών SO_x τα τελευταία χρόνια οφείλεται κυρίως στην ευρεία χρήση του HFO (Heavy Fuel Oil) από τα πλοία. Μάλιστα, είναι τόσο μεγάλα τα ποσοστά εκπομπών SO_x από την Ναυτιλία που υπολογίζεται ότι ήδη από το 2008, τα 15 μεγαλύτερα πλοία έχουν προκαλέσει την ίδια ζημία από SO_x όσο όλα τα αυτοκίνητα του κόσμου (Balcombe et.al, 2019). Σε μια άλλη ανάγνωση για το πόσο βλαβερή για το περιβάλλον είναι η Ναυτιλία, οι Wallker et.al (2019) αναφέρουν πως το 10-15% των παγκόσμιων εκπομπών NO_x ΚΑΙ SO_x προέρχεται αποκλειστικά από θαλάσσιες μεταφορές.

Ο θεσμός που είναι ο κύριος υπεύθυνος για θέματα του περιβάλλοντος και την δημιουργία ρυθμιστικού πλαισίου για την προστασία του από τις θαλάσσιες δραστηριότητες είναι ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization – εξής IMO). Ο IMO ως ανεξάρτητος και διακυβερνητικός οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών είναι υπεύθυνος για νομικά θέματα και ζητήματα ασφαλείας του περιβάλλοντος και γενικότερα όλων των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων. Από την ίδρυσή του στην Γενεύη το 1948 ως IMCO (Intergovernmental Maritime Consultative Organization), και πολύ περισσότερο από την μετονομασία του σε IMO το 1982 είναι

υπεύθυνος για την δημιουργία κανονιστικού πλαισίου για την βιωσιμότητα της Ναυτιλίας σε σχέση με την μόλυνση που προκαλούν οι Ναυτιλιακές δραστηριότητες.

Σχεδόν όλα τα κράτη που ασχολούνται με την Ναυτιλία παγκοσμίως εκπροσωπούνται στον IMO, ο οποίος αριθμεί σήμερα 174 κράτη μέλη και οργανώνεται σε τεχνικές επιτροπές (committees) και υπο-επιτροπές (sub-committees) για διάφορα θέματα της ναυτιλίας γενικότερα και του περιβάλλοντος ειδικότερα όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 4 (Psarafis & Kontovas, 2020).



Εικόνα 4 Η οργανωτική δομή του IMO (Psarafis & Kontovas 2020)

Η επιτροπή στην οποία αξίζει να σταθούμε είναι η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee – εξής MEPC), η οποία δημιουργήθηκε από τον IMO το 1973 και συντάσσεται από 1 έως 2 φορές τον χρόνο ώστε να διευθετηθούν περιβαλλοντολογικά ζητήματα που προκύπτουν από τις θαλάσσιες δραστηριότητες. Όπως φαίνεται από το γράφημα της Εικόνας 4, η επιτροπή αυτή άπτεται του Συμβουλίου του IMO και αποτελείται από

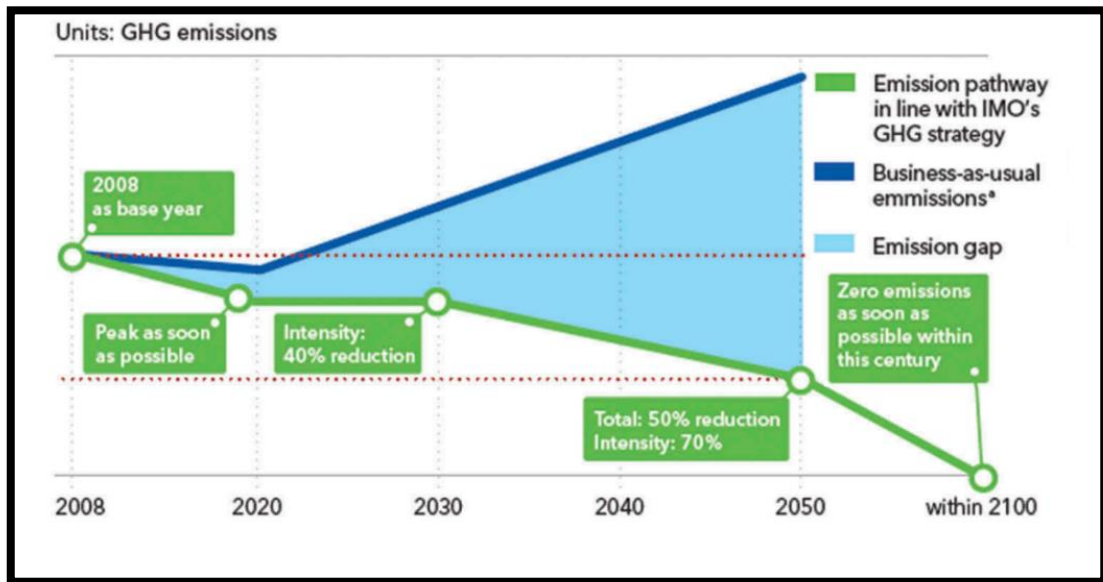
δυο υπό-επιτροπές, την Sub-Committee on Implementation of IMO Instruments (III) και από την Sub-Committee on Pollution Prevention and Response (PRP).

Από τις πιο κομβικές συντάξεις της MEPC ήταν αδιαμφισβήτητα η 72^η (9-13 Απριλίου του 2018), κατά την οποία επισημοποιήθηκε η στρατηγική του IMO για την μείωση των εκπομπών GHG από τα πλοία, η γνωστή και ως IMO Initial Strategy (Joung et.al 2020). Η στρατηγική αυτή είναι σε πλήρη συνάρτηση με την γνωστή Συνθήκη του Παρισιού (Paris Agreement under the United Nations Framework Convention on Climate Change) για την μείωση των εκπομπών GHG που υπογράφηκε το 2016. Συγκεκριμένα, δημοσιοποιήθηκαν οι στόχοι για μείωση κατά 50% των εκπομπών GHG έως το 2050 σε σχέση με τις αντίστοιχες εκπομπές του 2008. Παράλληλα, όπως φαίνεται και από το γράφημα της Εικόνας 5, ειδικά για το CO₂ τέθηκε ο στόχος για μείωση της πυκνότητας σε άνθρακα, αρχικά κατά 40% μέχρι το 2030, και 70% μέχρι το 2050, με τελικό στόχο μέσα σε αυτόν τον αιώνα να επιτευχθεί ο πλήρης απανθρακοποίηση (decarbonization) της Ναυτιλίας (Joung et.al, 2020).

Στην Εικόνα 5 επίσης διακρίνεται το μεγάλο χάσμα που υπάρχει μεταξύ των στόχων του IMO για χαμηλές εκπομπές GHG και των αναμενόμενων εκπομπών GHG σε BAU συνθήκες. Αυτό μαρτυρά από μόνο του ότι ο IMO ουσιαστικά έχει αποφασίσει ότι οι θαλάσσιες μεταφορές και δραστηριότητες είναι αδύνατον να συνεχιστούν ακολουθώντας τις σημερινές πρακτικές. Συνεπώς, οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες μας για θαλάσσιες μεταφορές σε συνάρτηση με την επιβεβλημένη μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος είναι ένα εγχείρημα που απαιτεί σαφή και δραστικά μέτρα τα οποία θα τηρούνται καθολικά.

Για να γεφυρωθεί το χάσμα αυτό που περιγράφεται παραπάνω ο IMO έχει θεσμοθετήσει κάποιους σχεδιαστικούς δείκτες, που θα αναλυθούν στις παρακάτω ενότητες, με σκοπό να υπολογίζεται η αποδοτικότητα κάθε πλοίου ξεχωριστά. Τα επιτρεπτά όρια των δεικτών αυτών στην ουσία υποχρεώνουν τις ναυτιλιακές να βρίσκουν τρόπους να εξελίσσουν τους στόλους τους με πλοία τα οποία είναι από τον σχεδιασμό τους πιο αποδοτικά, είτε αυτό αφορά τα συστήματα με τα οποία εξοπλίζονται, είτε καθαρά ναυπηγικά θέματα. Παρακάτω θα αναλυθούν οι τρόποι με

τους οποίους οι ναυτιλιακές μπορούν να βελτιστοποιούν τον σχεδιασμό των πλοίων τους ώστε να συμμορφώνονται με τα επιτρεπτά όρια εκπομπών αερίων και αποδοτικότητας που τίθενται όπως είπαμε από τον IMO (Lindstad et.al 2019)



Εικόνα 5 Η απόκλιση των στόχων του IMO με τα σενάρια BAU (Joung et.al,2020)

2.2 Ο Σχεδιαστικός Δείκτης EEDI

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, προκειμένου να επιτευχθούν όλα όσα στοχεύει ο IMO σχετικά με την στρατηγική μείωσης των εκπομπών GHG, απαιτούν χρόνο σχεδιασμό και δημιουργία κανονιστικού πλαισίου. Σε αυτή την κατεύθυνση, και αρκετά πριν την δημοσιοποίηση του IMO Initial Strategy, κατά την 62^η συνέλευση της MEPC (11-15 Ιουλίου 2011) αποφασίστηκε ότι κάθε πλοίο προκειμένου να μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του, θα πρέπει να εκδίδει και να φέρει ένα έγκυρο πιστοποιητικό Ενεργειακής Αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate - IEEC). Για την απόκτηση αυτού το πιστοποιητικού θα πρέπει το κάθε νεότευκτο πλοίο να συμμορφώνεται με τα όρια σχεδιαστικής αποδοτικότητας που ορίζει ένας νέος δείκτης, ο Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας πλοίου (Energy Efficiency Design Index, εξής EEDI) (IMO, 2011).

Δεν πρόκειται μόνο για έναν δείκτη που απλά εκφράζει πόσο αποδοτικό είναι ένα πλοίο βάσει του σχεδιασμού του, αντίθετα πρόκειται για το πρώτο επίσημο και

καθολικό μέτρο περιορισμού των εκπομπών GHG, που στοχεύει να ωθήσει τους πλοιοκτήτες να εξοπλίζουν τα πλοία τους με τα πιο εξελιγμένα συστήματα και να χρησιμοποιούν αποδοτικότερες μηχανές. Λόγω της υποχρεωτικότητας και καθολικότητας του μέτρου αυτού, θα αναλυθεί παρακάτω αρχικά το πώς υπολογίζεται και στην συνέχεια το πώς τα πλοία αλλάζοντας τον σχεδιασμό τους θα μπορούν να συμμορφώνονται με τα όρια του.

2.2.1 Ο Υπολογισμός του EEDI

Ο δείκτης EEDI εστιάζει μόνο στις εκπομπές CO₂, που όπως ειπώθηκε παραπάνω, θεωρείται το πιο επικίνδυνο GHG και βρίσκεται στο επίκεντρο των προσπαθειών για μείωση εκπομπών. Εκφράζει ουσιαστικά το πόσα γραμμάρια CO₂ εκπέμπει ένα πλοίο ανά μονάδα μεταφορικού έργου, συνεπώς όσο μικρότερο είναι το EEDI, τόσο πιο αποδοτικός θεωρείται ο σχεδιασμός του εκάστοτε πλοίου (Tokuslu, & Gazioglu, 2020). Το αριθμητικό αποτέλεσμα του EEDI εκφράζεται σε g CO₂ ανά τονομίλι, παρόλα αυτά ο υπολογισμός του (ο οποίος όπως είπαμε γίνεται στην φάση της σχεδίασης του πλοίου) είναι αρκετά σύνθετος, και φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

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

ή όπως εξηγεί ο IMO μετά από απλουστεύσεις:

Main Engine(s)	Aux Engine(s)	Innovative Energy Eff. Power Gen. Technologies	Innovative Energy Eff. Propulsion
-----------------------	----------------------	---	--

$$EEDI = \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*) + \left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

Από την παραπάνω ανάλυση του τύπου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι παράγοντες που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το EEDI χωρίζονται σε 4 σκέλη: (Polakis et.al, 2019)

1. Εκπομπές CO₂ από την κύρια μηχανή ή τις κύριες μηχανές (ME emissions)
2. Εκπομπές CO₂ από τις βοηθητικές μηχανές (AE emissions)

3. Εκπομπές CO₂ από καινοτόμες συσκευές παραγωγής ισχύος όπως οι αξονικές γεννήτριες (Innovative Power Gen, Technologies)
4. Η ισχύς πρόωσης που παρέχεται από καινοτόμες τεχνολογίες που εγκαθίστανται στα πλοία, όπως παραδείγματος χάρη τα πανιά (Inovative Energy Eff. Propulsion)

Γίνεται αντιληπτό και από τα πρόσημα των τεσσάρων αυτών παραγόντων αλλά και από την εξήγηση τους, ότι οι πρώτοι τρεις είναι αυτοί που δημιουργούν τις εκπομπές CO₂ (άρα όσο μεγαλώνουν, μειώνεται η αποδοτικότητα) και ο τέταρτος παράγοντας είναι αυτός που εξοικονομεί εκπομπές CO₂ και άρα αυξάνει την αποδοτικότητα του πλοίου. Η πραγματικότητα είναι ότι αυτές οι καινοτόμες τεχνολογίες πρόωσης δεν έχουν ακόμη ανεπτυγμένη και ευρεία εφαρμογή, ενώ πολλές φορές από τεχνοοικονομική άποψη είναι ασύμφορες προς τους πλοιοκτήτες. Σε παρακάτω ενότητα θα αναλυθούν οι ενέργειες και οι τρόποι ώστε, ρεαλιστικά από άποψη εφικτότητας, να μειώνεται η τιμή του δείκτη EEDI και άρα να αυξάνεται η αποδοτικότητα των πλοίων. Προς το παρόν και για να γίνουν πιο κατανοητά αυτά που ακολουθούν, πρέπει να αναλυθούν τα επιμέρους τμήματα της εξίσωσης υπολογισμού του EEDI (Hassan & Karim, 2023).

Όσον αφορά τον παρονομαστή της παραπάνω εξίσωσης:

- P_{ME} είναι το 75% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος (Maximum Continuous Rating – εξής MCR) της κάθε κύριας μηχανής σε kW.
- P_{AE} είναι η μέγιστη ισχύς των βοηθητικών μηχανών που χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει το μέγιστο ηλεκτρικό φορτίο και τα μηχανήματα πρόωσης (όπως π.χ. τα thruster)
- SFC είναι τα αρχικά του Specific Fuel Consumption, κοινώς η ειδική κατανάλωση καυσίμου. Είναι εκφρασμένη σε g/kWh και αντιπροσωπεύει την τα γραμμάρια καυσίμου που χρειάζεται μία μηχανή για να παράγει 1 kWh ενέργειας. Ανάλογα των τύπο των μηχανών, αυτή η τιμή είτε αποκτάται από το NOx Technical File, ή δηλώνεται από τον κατασκευαστή της μηχανής.

Ορίζεται ξεχωριστά για την κύρια μηχανή (SFC_{ME}) και την βοηθητική μηχανή (SFC_{AE}).

- C_F είναι ο συντελεστής μετατροπής (conversion factor). Εκφράζει τα γραμμάρια CO_2 που εκπέμπονται ανά γραμμάριο καυσίμου ($gCO_2 / g Fuel$). Ορίζεται ξεχωριστά για την κύρια μηχανή (C_{FME}) και την βοηθητική μηχανή (C_{FAE}). Εξαρτάται αποκλειστικά από το συγκεκριμένο καύσιμο που χρησιμοποιείται από το πλοίο καθώς για κάθε διαφορετικό καύσιμο η τιμή του αλλάζει.
- P_{PTI} είναι η το 75% της κατανάλωσης (σε kW) κάθε αξονικής γεννήτριας διαιρεμένο με την σταθμισμένη μέση απόδοση των γεννητριών. Δηλαδή:

$$\sum P_{PTI(i)} = \frac{\sum (0.75 \cdot P_{SM, \max(i)})}{\eta_{Gen}}$$

- f_{eff} είναι ο συντελεστής διαθεσιμότητας των καινοτόμων τεχνολογιών ενεργειακής αποδοτικότητας. Όταν αναφερόμαστε σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας, η τιμή του συντελεστή αυτού είναι 1, ενώ για την πλειοψηφία των υπολοίπων τεχνολογιών είναι λιγότερο από 1 με την έννοια ότι δεν είναι όλες τις ώρες διαθέσιμες. Για παράδειγμα αν ένα πλοίο χρησιμοποιεί πανιά ως υποβοήθηση της πρόωσης, αυτά δεν είναι ανοικτά καθ' όλη την διάρκεια του ταξιδιού παρά μόνο για ένα μέρος του, και κατά συνέπεια η τιμή του f_{eff} θα είναι μικρότερη της μονάδας.

Όσον αφορά τον παρονομαστή της εξίσωσης:

- V_{ref} είναι η ταχύτητα του πλοίου σε knots, την οποία αποκτά σε συνθήκη πλήρους φόρτου σε ανοικτά νερά και στο 75% του MCR. Ορίζεται από διαγράμματα ταχύτητας και ισχύος μηχανών του πλοίου, δεν είναι αυθαίρετη και εξαρτάται από το μέγεθος και τον τύπο του πλοίου.
- Capacity είναι η χωρητικότητα του πλοίου ή αλλιώς Dead Weight Tonnage (DWT) μετρημένη σε MT.
- f_C είναι ο κυβικός διορθωτικός παράγοντας χωρητικότητας, και ισχύει μόνο σε πλοία μεταφοράς LNG, δεξαμενόπλοια χημικών και καυσίμου. Για τους υπόλοιπους τύπους πλοίων ο συντελεστής αυτός είναι μονάδα.

- f_i είναι ένας διορθωτικός παράγοντας χωρητικότητας ο οποίος είναι και αυτός μονάδα για σχεδόν όλα τα πλοία, εκτός από πλοία που έχουν ενισχυθεί ειδικά για να πλέουν σε πάγο ή έχουν υποστεί δομική ενίσχυση.
- f_w είναι ο διορθωτικός παράγοντας καιρού και εκφράζει την μείωση της ταχύτητας λόγω κυμάτων και αέρα. Για να έχει αυτός ο παράγοντας οποιαδήποτε άλλη τιμή εκτός από μονάδα, θα πρέπει το πλοίο να είναι δηλωμένο ότι πλέει αποκλειστικά σε περιοχές με δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Γίνεται σαφές από την παραπάνω ανάλυση των συντελεστών της εκτενούς εξίσωσης υπολογισμού του EEDI, ότι οι περισσότεροι παράγοντες στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι μοναδιαίοι για αυτό και στην γενικότητα του παραλείπονται. Η ουσιαστική προσέγγιση του προβλήματος της μείωσης του EEDI γίνεται με την απλοποίηση των τύπων, όπως φαίνεται στην παρακάτω ενότητα.

2.2.2 Η μείωση των επιπέδων αναφοράς του EEDI

Οι πολυσύνθετοι τύποι που αναλύθηκαν παραπάνω εξηγούν μεν τους βασικούς άξονες που επηρεάζουν τον δείκτη EEDI ενός πλοίου, παρόλα αυτά δεν κάνουν ξεκάθαρο ποιος είναι ο ρόλος του δείκτη αυτού και πως εφαρμόζονται τα όρια του.

Είναι αντιληπτό από την παραπάνω ανάλυση ότι ένα πλοίο που δεν διαθέτει αξονική γεννήτρια ούτε κάποια άλλη καινοτομία υποβοήθησης πρόωσης όπως είναι τα πανιά, ο τύπος υπολογισμού του EEDI απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$EEDI = \frac{\text{Engine power} \times SFC \times CF}{DWT \times \text{speed}}$$

η οποία είναι αντιπροσωπευτική για την πλειοψηφία των πλοίων που πλέουν σήμερα, συνεπώς η ανάλυση που θα ακολουθήσει είναι συμπεριληπτική και έγκυρη.

Το αριθμητικό αποτέλεσμα που παράγει η παραπάνω εξίσωση, αντιστοιχεί σε αυτό που ο IMO ονομάζει Attained EEDI, δηλαδή η τιμή του δείκτη αποδοτικότητας, σε γραμμάρια CO₂ ανά τονομίλι, που αντιστοιχεί σε κάθε πλοίο. Αυτή η τιμή πρέπει

να είναι μικρότερη η ίση με μια τιμή βάσης, η οποία ονομάζεται Required EEDI και υπολογίζεται για κάθε τύπο πλοίου, και όχι για κάθε πλοίο ξεχωριστά, ενώ όπως θα δούμε παρακάτω, ανάλογα την χρονική περίοδο αυτή η τιμή βάσης όλο και μειώνεται με αποτέλεσμα να γίνεται δυσκολότερο από τα πλοία να μην το ξεπερνούν. Με άλλα λόγια ισχύει ο τύπος:

$$\text{Attained EEDI} \leq \text{Required EEDI} = (1-X\%) \times \text{Reference line value}$$

- Όπου X είναι ο παράγοντας μείωσης ο οποίος είναι διαφορετικός ανά τύπο και μέγεθος πλοίου και που αυξάνεται όσο προχωράμε χρονικά στις φάσεις του EEDI. Στην παρακάτω Εικόνα 6 είναι ο συγκεντρωτικός πίνακας που παρουσιάζει τις τιμές που παίρνει ο παράγοντας X για τις κυριότερες κατηγορίες πλοίων ανάλογα με την μεταφορική τους ικανότητα (Ren et.al, 2019).
- Αυτό που αναφέρεται ως Reference line value είναι ένα επίπεδο αναφοράς που υπολογίζεται ως εξής: $\text{Reference line value} = a \times b^{-c}$, όπου a, b και c είναι κάποιες παράμετροι που καθορίζονται πάλι ανάλογα τον τύπο και το Dead Weight Tonnage (DWT), την μεταφορική ικανότητα δηλαδή, του πλοίου. Στον Πίνακα της Εικόνας 7 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων για τις κυριότερες κατηγορίες πλοίων (IMO,2011).

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 onwards
Bulk carrier	≥20,000 DWT	0	10	20	30
	10,000–20,000 DWT	n/a	0–10 *	0–20 *	0–30 *
Tanker	≥20,000 DWT	0	10	20	30
	4000–20,000 DWT	n/a	0–10 *	0–20 *	0–30 *
Containership	≥15,000 DWT	0	10	20	30
	10,000–15,000 DWT	n/a	0–10 *	0–20 *	0–30 *

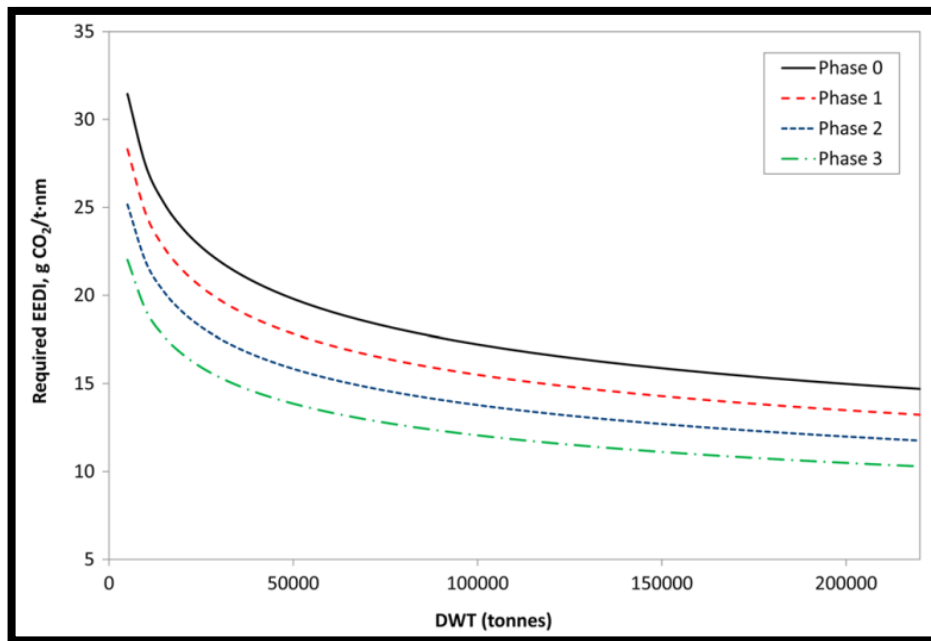
Εικόνα 6 Οι τιμές του παράγοντα μείωσης για τους βασικούς τύπους πλοίων (Ren et.al., 2019)

Ship type defined in regulation 2	a	b	c
2.25 Bulk carrier	961.79	DWT of the ship	0.477
2.26 Gas carrier	1120.00	DWT of the ship	0.456
2.27 Tanker	1218.80	DWT of the ship	0.488
2.28 Containership	174.22	DWT of the ship	0.201
2.29 General cargo ship	107.48	DWT of the ship	0.216

Εικόνα 7 Οι τιμές των παραμέτρων a,b και c ανάλογα με τον τύπο πλοίου (IMO,2011)

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν οι τιμές του Required EEDI, ανάλογα με την φάση του EEDI που βρισκόμαστε χρονικά, και αυτό είναι το όριο που υποχρεώνεται κάθε πλοίο να μην ξεπερνάει με το Attained EEDI που αποκτά στην φάση του σχεδιασμού του. Ένα παράδειγμα, που είναι ενδεικτικό της αυστηροποίησης των ορίων του EEDI, είναι οι καμπύλες των τιμών Required EEDI που προκύπτουν για τα Bulk Carriers και φαίνονται στην Εικόνα 8 (Vladimir et.al, 2017).

Με βάση αυτό το γράφημα, αν ένα πλοίο 100.000 DWT έχει Required EEDI ίσο με 15, τότε για την Φάση 2 που βρισκόμαστε σήμερα (μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου του 2024) το πλοίο αυτό μπορεί να εκδώσει IEEC καθώς ισχύει η συνθήκη Attained EEDI \leq Required EEDI. Όμως για την ερχόμενη Φάση 3 (που για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω αλλά και φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 7) το Required EEDI μειώνεται τόσο ώστε να μην ισχύει η αναγκαία συνθήκη, το εν λόγω πλοίο δεν θα μπορεί να εκδώσει εκ νέου IEEC και κατά συνέπεια δεν θα μπορεί να λειτουργεί. Σε αυτή την περίπτωση το πλοίο αυτό θα πρέπει να διαλυθεί, ή να υποστεί μετασκευή μεγάλης κλίμακας (στην μηχανή ή/και στην γάστρα) ώστε να αποκτήσει εκ νέου μια τιμή Attained EEDI που να είναι μικρότερη από το Required EEDI.



Εικόνα 8 Τα όρια κάθε φάσης του EEDI για τα Container Ships (Vladimir, et.al, 2017).

Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί ότι ο δείκτης EEDI ως σχεδιαστικός δείκτης, δεν επηρεάζεται από μεθόδους που αφορούν την λειτουργία του πλοίου και όχι τον σχεδιασμό του καθατών. Για παράδειγμα, η επιλογή βέλτιστης ταχύτητας ταξιδιού είναι προφανώς κάτι που κάνει το πλοίο πιο αποδοτικό για το συγκεκριμένο ταξίδι, αλλά εν προκειμένω η τιμή του EEDI θα παραμείνει η ίδια. Οι τρόποι, οι τεχνολογίες και οι πρακτικές που ακολουθούνται ώστε το πλοίο να είναι πιο αποδοτικό ως προς την λειτουργία του είναι κάτι που αφορά επόμενα κεφάλαια και άλλους δείκτες αποδοτικότητας. Στην παρακάτω ενότητα θα αναλυθεί η επικρατέστερη επιλογή για την μείωση του EEDI και την συμμόρφωση με τα νόμιμα όρια, που δεν είναι άλλη από την χρήση Εναλλακτικών Καυσίμων.

2.3 Τα εναλλακτικά καύσιμα ως τρόπος μείωσης του EEDI

Στην Ναυτιλία ακόμη και σήμερα χρησιμοποιούνται κατά βάσει καύσιμα χαμηλής βαθμίδας όπως το HFO (Heavy Fuel Oil) και το MDO (Marine Diesel oil). Συγκεκριμένα πάνω από 300 εκατομμύρια τόνοι από τέτοια καύσιμα χρησιμοποιούνται κάθε χρόνο, ποσότητα που αντιστοιχεί περίπου στο 7% της παγκόσμιας κατανάλωσης καυσίμου. Η χαμηλή ποιότητα αυτών των καυσίμων που χρησιμοποιούν τα περισσότερα πλοία έχουν ως αποτέλεσμα το 15% των εκπομπών

NO_x και το 10% των εκπομπών SO_x να προέρχονται μόνο από τις Ναυτιλιακές δραστηριότητες. Πέρα από αυτά, υπάρχει και ο παράγοντας του CO₂ που αυτή τη στιγμή, όπως ειπώθηκε παραπάνω, απασχολεί τους πλοιοκτήτες λόγω των περιορισμών του EEDI.

Τα πιο ευρέως διαδεδομένα καύσιμα στην Ναυτιλία, δηλαδή το MGO, HFO και το LFO, έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, με αποτέλεσμα να έχουν αυξημένες εκπομπές CO₂ κατά την καύση τους. Για αυτόν τον λόγο, έχουν προκύψει ως λύσεις τα Εναλλακτικά Καύσιμα, δηλαδή καύσιμα με πολύ μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα. Τα βασικότερα από αυτά είναι το LNG (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο, Liquefied Natural Gas), το LPG (Υγραέριο, Liquefied Petroleum Gas), η Αιθανόλη και η Μεθανόλη (Mao & Meng, 2022).

Ο λόγος που αναφέρονται τα Εναλλακτικά καύσιμα σε σχέση με την μείωση του EEDI, είναι ο συντελεστής μετατροπής (C_F) που εκφράζει τα γραμμάρια CO₂ που εκπέμπονται ανά γραμμάριο καυσίμου (gCO₂/gFuel). Με μία υπενθύμιση της εξίσωσης υπολογισμού της τιμής του Attained EEDI για ένα πλοίο παρακάτω, γίνεται κατανοητό πως όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα ενός καυσίμου σε άνθρακα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής μετατροπής άρα και η τιμή του EEDI είναι ψηλότερη και το πλοίο λιγότερο αποδοτικό.

$$EEDI = \frac{\text{Engine power} \times \text{SFC} \times CF}{DWT \times \text{speed}}$$

Όπως φαίνεται από την παρακάτω Εικόνα 9, η περιεκτικότητα των εναλλακτικών καυσίμων σε άνθρακα και ο παράγοντας μετατροπής τους είναι σημαντικά μικρότερο από τους αντίστοιχους των συμβατικών καυσίμων. Αυτό συνεπάγεται ευθέως ότι τα εναλλακτικά καύσιμα βοηθούν στην χαμηλότερη τιμή Attained EEDI για ένα πλοίο, παρόλα αυτά δεν αποτελούν πανάκεια για την Ναυτιλία, καθώς τίθενται πολλά τεχνοοικονομικά θέματα βιωσιμότητας σχετικά με την ευρεία χρήση τους. Παρακάτω θα παρουσιαστεί το LNG ως το κυρίαρχο εναλλακτικό καύσιμο και θα αναλυθεί ο ρόλος του στην σημερινή Ναυτιλία και το μέλλον.

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

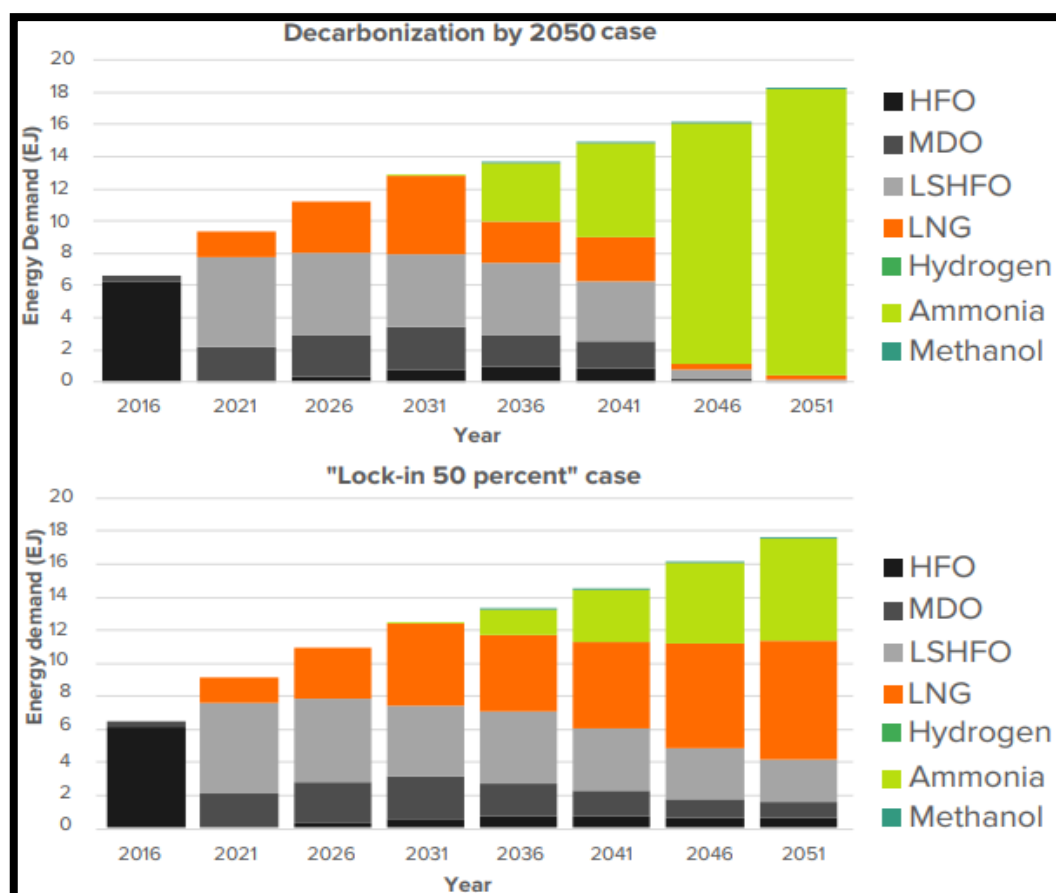
Εικόνα 9 Οι συντελεστές μετατροπής των συμβατικών και εναλλακτικών καυσίμων (Tokuslu & Gazioglu, 2020)

2.3.1 Το LNG και το μέλλον του στην Ναυτιλία

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, το LNG είναι ένα εναλλακτικό καύσιμο που μπορεί να προσφέρει πολλά στην Ναυτιλία στην προσπάθεια της να μειώσει το περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα των δραστηριοτήτων της. Αυτό διότι το LNG είναι ένα λιγότερο βλαβερό για την ατμόσφαιρα καθώς είναι καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε NO_x και SO_x ενώ σε σχέση με το HFO διαθέτει 30% λιγότερο άνθρακα ανά μονάδα χημικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, οι εκπομπές CO₂ από το LNG είναι χαμηλότερες σε σχέση με τα παραδοσιακά καύσιμα της Ναυτιλίας.

Παρόλα αυτά, η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα δεν σημαίνει ότι το LNG είναι θετικό για το περιβάλλον και αποτελεί μονόδρομο για όλα τα πλοία. Το υγροποιημένο μεθάνιο από το οποίο αποτελείται αυτό το καύσιμο είναι 86 φορές πιο βλαβερό σε ορίζονται 20ετίας από το CO₂ και αυτό δημιουργεί αβεβαιότητα για το μέλλον σχετικά με την χρήση του. Εφόσον δεν υπάρχει ακόμα σχετική νομοθεσία για περιορισμό του μεθανίου, του LNG σαφώς βοηθά στην μείωση του EEDI για ένα πλοίο λόγω της χαμηλότερης περιεκτικότητας του σε άνθρακα (Ytreberg et.al,2021).

Το ζήτημα είναι η βιωσιμότητα της ευρείας χρήσης του στο μέλλον, κάτι που έχει διχάσει τους εμπλεκόμενους στην Ναυτιλία. Παρόλα αυτά τα επικρατέστερα σενάρια σύμφωνα με την βιβλιογραφική έρευνα των Englert et.al (2021) είναι δύο και φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 10. Συγκεκριμένα, και παίρνοντας ως δεδομένο ότι αυτή την στιγμή περίπου το 10% της ενεργειακής ζήτησης της Ναυτιλίας καλύπτεται από το LNG, στον ορίζοντα της 25ετίας που μας απομένει μέχρι τον απολογισμό των στόχων του 2050, το ποσοστό αυτό είτε θα μειωθεί είτε θα αυξηθεί. Στο πάνω διάγραμμα της Εικόνας 10 φαίνεται ένα αισιόδοξο σενάριο όπου το 2050 θα έχει επιτευχθεί στην ουσία το πολυπόθητο Decarbonization της Ναυτιλίας και εκεί το LNG, αφού για μία δεκαετία θα έχει περεταίρω αναπτυχθεί, πλέον θα έχει μηδαμινή συνεισφορά λιγότερο του 1% της ικανοποίησης της ζήτησης. Αντίθετα στο ίσως πιο ρεαλιστικό σενάριο που φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 10, το «μείγμα» καυσίμων το 2050 θα αποτελείται κατά 40-50% από LNG. Τα γραφήματα αυτά δίνουν αφορμή για την εξέταση και άλλων εναλλακτικών καυσίμων που απασχολούν αυτή την στιγμή τους εμπλεκόμενους της Ναυτιλίας σχετικά με το μέλλον των καυσίμων.



Εικόνα 10 Τα σενάρια χρήσης LNG στο μέλλον (Englert et.al, 2021)

2.3.2 Carbon-free Εναλλακτικά Καύσιμα και Συμπεράσματα

Πέρα από όσα καύσιμα αναλύθηκαν παραπάνω, τα οποία είναι εμφανές ότι λόγω χαμηλότερου C_F θα προσφέρουν χαμηλότερο EEDI, υπάρχουν και άλλα εναλλακτικά καύσιμα για τα οποία δεν υπάρχει συμβατότητα με τον όρο C_F όπως τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο και η αμμωνία.

Τα βιοκαύσιμα προέρχονται από φυσικές πηγές όπως ζωικά λίπη και η διαδικασία παραγωγής τους περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό των φυσικών υλικών αυτών μέσω χημικών ή βιολογικών διαδικασιών σε υγρό καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από ειδικούς κινητήρες για παραγωγή κίνησης με μηδενικές εκπομπές CO_2 . Παρόλα αυτά φαίνεται πως η παραγωγή τους σε ευρεία κλίμακα δεν είναι βιώσιμη καθώς δημιουργούνται τεράστιες ποσότητες εκπομπών N_2O το οποίο είναι πολύ βλαβερότερο του CO_2 τόσο για την ατμόσφαιρα όσο και για την γη. Γίνονται μεγάλες προσπάθειες ώστε στο μέλλον αυτά τα προβλήματα παραγωγής να μπορέσουν να υπερνικηθούν, παρόλα αυτά δεν είναι ξεκάθαρο ακόμη το πως θα γίνει βιώσιμη από οικονομικής άποψης η ευρεία χρήση των βιοκαυσίμων στην Ναυτιλία. Σε κάθε περίπτωση, για την επίτευξη των στόχων για απαλλαγή από τον άνθρακα τα βιοκαύσιμα θα χρειαστεί να αναπτυχθούν ώστε να μπορούν να αναλάβουν ποσοστό της ζήτησης Ενέργειας από την Ναυτιλία. (Acomi & Acomi, 2014).

Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι για να μπορούν τα βιοκαύσιμα να παίξουν και θεσμικό, πέρα από ουσιαστικό, ρόλο, δηλαδή να έχουν επίδραση στον EEDI, θα πρέπει στο μέλλον να οριστεί ένας επίσημος συντελεστής C_F , ώστε να μπορούν τα πλοία που χρησιμοποιούν βιοκαύσιμα να αξιολογούνται βάσει της σχεδιαστικής τους αποδοτικότητας από το μέτρο του EEDI.

Το Υδρογόνο και οι ουσίες που φέρουν υδρογόνο όπως η Αμμωνία (NH_3), μπορούν όπως είναι ευρέως γνωστό να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα από κινητήρες εσωτερικής καύσης ή κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells) προκειμένου να παράγουν ενέργεια πρόωσης. Τα απόβλητα της καύσης σε αυτή την περίπτωση είναι μόνο νερό, NO_x και θερμότητα εφόσον τα υδρογόνο και η αμμωνία έχουν μηδενική περιεκτικότητα σε άνθρακα, κάτι που οδηγεί στον συλλογισμό ότι η σχεδίαση ενός

πλοίου που λειτουργεί αποκλειστικά με αυτά τα καύσιμα θα είχε μηδενικό Attained EEDI (εφόσον $C_F = 0$). Παρόλα αυτά δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή διαθέσιμη τεχνολογία ώστε να παράγεται και να αποθηκεύεται με συμφέρον τρόπο ένα τέτοιο καύσιμο.

Συγκεκριμένα, το υδρογόνο είναι πολύ εύφλεκτο αέριο και η μεταφορά του ως υγρό καύσιμο από ένα πλοίο απαιτεί θερμοκρασία -252 βαθμούς κελσίου με ατμοσφαιρική πίεση (πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή της μεταφοράς LNG). Συνεπώς γίνεται αυτομάτως μη πρακτικό για χρήση σε μεγάλα πλοία και στην δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε συγκεκριμένα πλοία που εξυπηρετούν πολύ μικρά δρομολόγια (πχ σε ποτάμια). Αντίθετα η αμμωνία για τη μεταφορά της ως υγρό καύσιμο απαιτεί -33 βαθμούς κελσίου σε πίεση 81MPa οπότε η μεταφορά της από πλοία εμπορικής ναυτιλίας είναι αρκετά πιο πρακτική. Παρόλα αυτά η μεταφορά της και η χρήση της ως καύσιμο ενέχει πολλούς κινδύνους λόγω της τοξικότητας της Αμμωνίας. Γενικότερα και τα δύο αυτά carbon-free εναλλακτικά καύσιμα είναι πολύ πιο εύφλεκτα και εισάγουν θέματα ασφάλειας για στο πλοίο και το πλήρωμα σε περιπτώσεις βλαβών. Απαιτούνται δηλαδή μεγάλα ποσά επενδύσεων για την ανάπτυξη βιώσιμων τρόπων μεταφοράς των καυσίμων αυτών και θέσπιση προτύπων ασφαλείας, πολύ περισσότερα από ότι με τα συμβατικά καύσιμα ή το LNG,

Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή του καυσίμου που θα χρησιμοποιεί ένα καινούριο πλοίο είναι δύσκολη απόφαση για τους πλοιοκτήτες, καθότι πρέπει να συνυπολογίσουν παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα του καυσίμου και η διακύμανση της τιμής τους όπως επίσης και το κόστος απόκτησης του κατάλληλου κινητήρα. Είναι άλλωστε γνωστό ότι τα καύσιμα αποτελούν το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος ενός πλοίου, από 35% - 70% επί του συνολικού, άρα η μη συμφέρουσα επιλογή καυσίμου μπορεί να οδηγήσει σε υποχρέωση για πρόωρη απόσυρση ενός πλοίου (Perera & Mo, 2016).

Το ποιο θα είναι το εναλλακτικό καύσιμο που θα κυριαρχήσει είναι κάτι προς το παρόν άγνωστο, γνωστό παρόλα αυτά είναι αφενός ότι η περιβαλλοντική κατάσταση επιτάσσει την ανάγκη εύρεσης μιας λύσης και αφετέρου ότι η πλήρης απαλλαγή από τον άνθρακα απαιτεί ποσά επενδύσεων της τάξης των 185 δις \$.

2.4 Συνδυασμός Πλοίου-Μηχανής-Προπέλας και EEDI

Πέρα από την επιλογή του καυσίμου, σημαντικό ρόλο στην σχεδιαστική αποδοτικότητα του νέου πλοίου παίζουν και θέματα ναυπηγικής φύσεως, όπως η βελτιστοποίηση της γάστρας ή μεγιστοποίηση χωρητικότητας φορτίου. Οι βελτιστοποιήσεις αυτές γίνεται εύκολα αντιληπτό κατόπιν της παραπάνω ανάλυσης ότι θα αναβάθμιζαν τον EEDI ενός πλοίου, παρόλα αυτά τα αμιγώς ναυπηγικά θέματα δεν αφορούν το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Αυτό που μπορεί να αναλυθεί, από της σκοπιά που εξετάζονται τα πράγματα έως τώρα, είναι η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού Πλοίου-Μηχανής-Προπέλας και οι ενδεχόμενες θετικές επιπτώσεις στην τιμή του EEDI.

Η επιλογή αυτού του συνδυασμού δεν είναι απλή υπόθεση καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψιν σύνθετες παράμετροι όπως η αντίσταση της γάστρας, τα διαγράμματα ποσοστών φόρτισης της μηχανής όπως και το είδος των υδάτων που αναμένεται κυρίως να πλέει το πλοίο (Hansen et.al 2020). Πρόκειται για μια πολύ κρίσιμη διαδικασία καθώς από τα προωστήρια συστήματα ενός πλοίου προέρχεται το 80% των εκπομπών GHG, συνεπώς μία μη ιδανική επιλογή πιθανώς να καταστήσει το πλοίο μη βιώσιμο αποδοτικά στο μέλλον (Vladimir et.al, 2017). Φυσικά δεν υπάρχει πανάκεια στην επιλογή του συνδυασμού Πλοίου-Μηχανής-Προπέλας, παρόλα αυτά πρέπει να επισημανθεί ότι μέχρι και την εφαρμογή του EEDI, ο περισσότερες μελέτες εστίαζαν κυρίως στην αποδοτικότητα της πρόωσης καθαυτής και στο κόστος καυσίμου, αγνοώντας τις περιβαλλοντολογικές επεκτάσεις του ζητήματος.

Για την ανάλυση του ζητήματος του συνδυασμού Πλοίου-Μηχανής-Προπέλας, αλλά και για την επί της ουσίας απόδειξη του ρόλου του στην διαμόρφωση του EEDI θα χρησιμοποιηθεί μια έκφραση του τύπου του EEDI που αναλύθηκε παραπάνω.

Συγκεκριμένα, για ένα πλοίο εξοπλισμένο με Direct-Drive κινητήρα ντίζελ, χωρίς προσθήκες άλλων προωστήριων συστημάτων, ο τύπος υπολογισμού του EEDI είναι ο παρακάτω:

$$EEDI = \frac{f_j \cdot P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_c \cdot f_l \cdot f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

Για την συγκεκριμένη ανάλυση, το SFC θεωρείται σταθερό, όπως επίσης και CF, εφόσον το είδος του κινητήρα και του καυσίμου είναι προαποφασισμένο. Ως σταθερές επίσης λαμβάνονται και οι διορθωτικοί παράγοντες αφού δεν αφορούν καθόλου στην επιλογή προπέλας. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω παραμέτρους ως σταθερές, ο παραπάνω τύπος παίρνει την μορφή:

$$EEDI = \frac{f_j \cdot P_{ME} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_c \cdot f_l \cdot f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} = \frac{c_1 \cdot P_{ME} + c_2}{c_3 \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$

Όπου $c_1 = f_j \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}$, $c_2 = P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}$ και $c_3 = f_c \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_w$

Ήδη η τιμή του EEDI φαίνεται να εξαρτάται από την P_{ME} . Όπως είναι γνωστό:

$$P_{ME} = \frac{P_E}{\eta_{TRM} \cdot \eta_D} = \frac{P_E}{\eta_{TRM} \cdot \eta_H \cdot \eta_O \cdot \eta_R}$$

Όπου :

- P_E είναι η ισχύς που απαιτείται ώστε να υπερνικηθεί η συνολική αντίσταση R του πλοίου και να κινηθεί με ταχύτητα V_S ($P_E = R \cdot V_S$)
- η_{TRM} ο βαθμός μετάδοσης ισχύς από την μηχανή στην προπέλα
- η_D ο βαθμός περιστροφικής απόδοσης (relative rotation efficiency)
- η_O ο βαθμός απόδοσης προπέλας (propeller open water efficiency). Είναι ο λόγος ωφέλιμης ισχύος που αναπτύσσει η έλικα προς την ισχύ που δαπανήθηκε για να την περιστροφή της.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, ο τύπος υπολογισμού του EEDI παίρνει την παρακάτω ενδιάμεση μορφή:

$$\begin{aligned} EEDI &= \frac{c_1 \cdot P_{ME} + c_2}{c_3 \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &= \frac{c_1 \cdot P_E}{c_3 \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot \eta_{TRM} \cdot \eta_H \cdot \eta_O \cdot \eta_R} + \frac{c_2}{c_3 \cdot Capacity \cdot V_{ref}} \\ &= \frac{c_4 \cdot P_E}{Capacity \cdot V_{ref} \cdot \eta_O} + \frac{c_5}{Capacity \cdot V_{ref}} \end{aligned}$$

Όπου $c_4 = (c_1 / (c_3 \cdot \eta_{TRM} \cdot \eta_H \cdot \eta_R))$ και $c_5 = c_2 / c_3$

Συνεπώς για ένα δεδομένο πλοίο με προκαθορισμένες τιμές ταχύτητας V_{ref} , χωρητικότητας (Capacity) και ισχύς μηχανής P_{ME} η συσχέτιση μεταξύ EEDI και προπέλας φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$EEDI = \frac{c_6}{\eta_0} + c_7$$

Όπου $c_6 = c_4 \cdot P_E / \text{Capacity} \cdot V_{ref}$ και $c_7 = c_5 / \text{Capacity} \cdot V_{ref}$

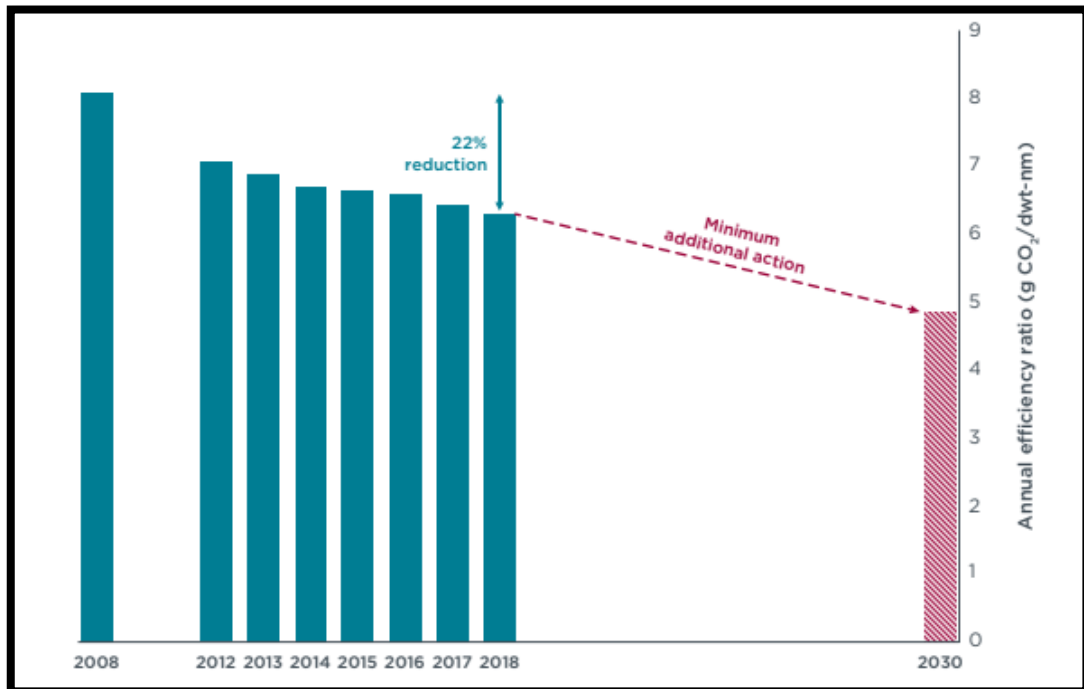
Από την τελευταία αυτή εξίσωση φαίνεται ότι η τιμή του EEDI είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τιμή του βαθμού απόδοσης της προπέλας, πράγμα που μαρτυρά πως κατά την αναζήτηση της βέλτιστης προπέλας για ένα πλοίο παράλληλα επιτυγχάνεται και βέλτιστη τιμή του EEDI για το πλοίο αυτό.

Η βέλτιστος συνδυασμός Πλοίου-Μηχανής-Προπέλας όπως ειπώθηκε προηγουμένως άπτεται των αμιγώς ναυπηγικών θεμάτων, άρα δεν έχει νόημα να αναλυθούν σε αυτή την εργασία. Παρόλα αυτά, όπως αναφέρουν οι Ren et.al (2019), κύριο ζήτημα είναι η βελτιστοποίηση της γάστρας και η αύξηση του μεγέθους της προπέλας, με αποτέλεσμα να μειωθεί η σχεδιαστική ταχύτητα (V_{ref}) του πλοίου. Σύμφωνα με αυτή την έρευνα, μια θυσία του 10% της V_{ref} του πλοίου στο στάδιο του σχεδιασμού του δύναται να οδηγήσει σε έως και 16% μείωση του EEDI.

2.5 Ο δείκτης EEXI

Από αυτά ειπώθηκαν παραπάνω σχετικά με τον EEDI, έγινε κατανοητό πως αυτός ο σχεδιαστικός δείκτης αποδοτικότητας αφορά νεότευκτα πλοία, με σκοπό να εισάγονται στην ναυλαγορά πλοία που με την εφαρμογή νέων τεχνολογιών και την χρήση εναλλακτικών καυσίμων λειτουργούν με την βέλτιστη απόδοση. Αυτό το εγχείρημα κατά την πρώτη φάση του (2015-2019), σε συνάρτηση φυσικά με τα μέτρα για το λειτουργικό κομμάτι που θα αναλυθούν στα παρακάτω κεφάλαια, πράγματι οδήγησαν την Ναυτιλία σε μείωση του Carbon Intensity κατά 22% σε σχέση με το 2008 (ICCT, 2020). Όπως φαίνεται όμως από το γράφημα της Εικόνας 11, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του Initial Strategy του IMO το 2030 για 40%

μείωση των εκπομπών CO₂ ανά τονομίλι, χρειάζονται επιπλέον ενέργειες ώστε να εξασφαλιστεί η περεταίρω μείωση 18% που απαιτείται.



Εικόνα 11 Η μείωση κατά 22% του Carbon Intensity από το 2008 και ο στόχος του 2030

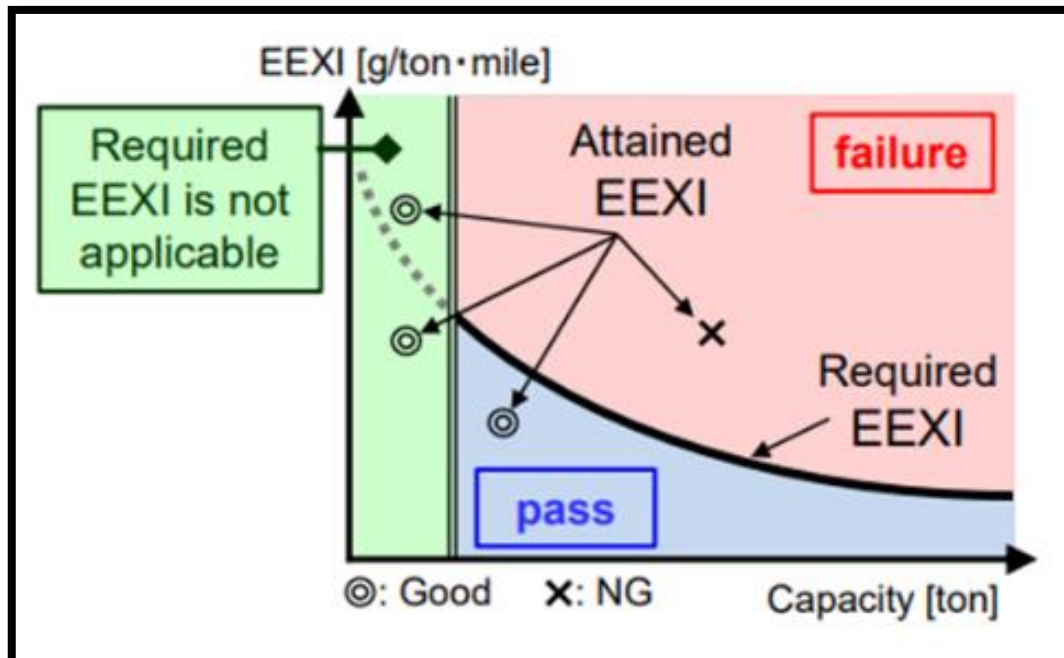
Για να γίνει εφικτός ο στόχος που τέθηκε για το 2030, ο IMO αναγνώρισε την ανάγκη για κάποια άμεσα και πιο βραχυπρόθεσμα μέσα, και έτσι κατά την 76^η MEPC (10-17 Ιουνίου 2021), ανακοίνωσε την εφαρμογή του Energy Efficiency Existing Ship Index (εξής EEXI). Πρόκειται για μια εκδοχή του EEDI που αναλύθηκε παραπάνω, που όμως εφαρμόζεται σε όλα τα υπάρχοντα πλοία 400GT και άνω. Στόχος είναι πάλι αρχικά να υπολογιστεί η αποδοτικότητα του πλοίου, εκφρασμένη σε γραμμάρια CO₂ που εκπέμπονται ανά τονομίλι, και αφετέρου να εξασφαλιστεί ότι η τιμή αυτή είναι κάτω από τα επιτρεπτά όρια για την εκάστοτε κατηγορία πλοίου.

Γίνεται δηλαδή πάλι λόγος για Required EEXI για διάφορους τύπους και μεγέθη πλοίων, και Attained EEXI για κάθε πλοίο ξεχωριστά. Τόσο το Required όσο και το Attained EEXI, υπολογίζονται κατά τρόπο ίδιο με το EEDI, δηλαδή:

$$EEXI \left[\frac{g}{\text{ton} \cdot \text{mile}} \right] = \frac{CO_2 \text{ Conversion factor} \cdot SFC \left[\frac{g}{kW \cdot h} \right] \cdot \text{Engine Power} [kW]}{\text{Capacity} [\text{ton}] \cdot V_{ref}}$$

$$\text{Required EEXI} = \left(1 - \frac{X}{100} \right) * \text{EEXI Reference Line}$$

Κατά τα πρότυπα του EEDI, έτσι και στον EEXI, το όριο του Required EEDI διαρκώς μειώνεται, καθώς η τιμή του παράγοντα μείωσης X παίρνει τις τιμές από τον Πίνακα της Εικόνας 6 παραπάνω. Αντίστοιχα, το ζητούμενο ώστε το πλοίο να μπορεί να λειτουργεί νόμιμα, είναι η τιμή του Attained EEXI του να είναι χαμηλότερο από το όριο που ορίζει το Required EEXI (Εικόνα 12).



Εικόνα 12 Περιπτώσεις επιτυχούς και μη επιτυχούς συμμόρφωσης με τα όρια του EEXI (ClassNK, 2021)

Ο EEXI, εφόσον αποτελεί και αυτός έναν σχεδιαστικό δείκτη, προκειμένου να μειωθεί και να φτάσει στα επιτρεπτά όρια για ένα υπάρχον πλοίο, θα πρέπει να εφαρμοστούν πρακτικές που αφορούν τον σχεδιασμό (Design) του πλοίου και όχι την λειτουργία του (Operation).

Ενώ, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, υπάρχει ευελιξία στις ναυπηγικές και μηχανολογικές επιλογές για τα νεότευκτα πλοία ώστε να συμμορφώνονται με τα όρια του EEDI, στην περίπτωση των εν λειτουργία πλοίων που υπάγονται στον EEXI οι

επιλογές είναι περιορισμένες. Είναι εύκολα αντιληπτό άλλωστε, πως ένα πλοίο που την δεδομένη στιγμή σχεδιάζεται, είναι πολύ ευκολότερο να προσαρμόσει τον σχεδιασμό του, από ότι ένα πλοίο που ήδη έχει σχεδιαστεί και ναυπηγηθεί. Συνεπώς, οι ναυτιλιακές έχουν περισσότερες επιλογές και τακτικές που μπορούν να ακολουθήσουν προκειμένου τα καινούρια τους πλοία να συμμορφώνονται με τον EEDI, αλλά πολύ λιγότερες όταν πρόκειται τα υπάρχοντα πλοία τους να συμμορφώνονται με τον EEXI.

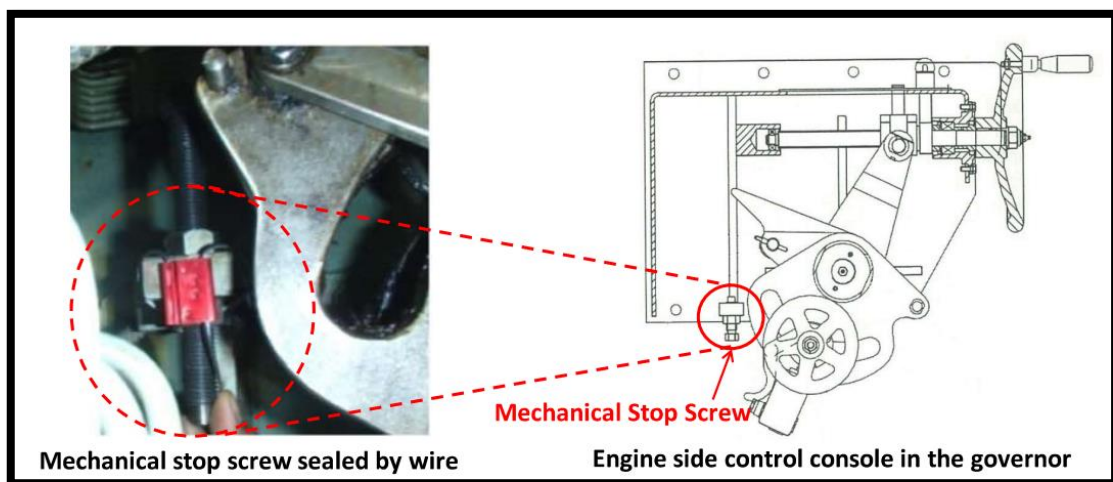
Οι εκτεταμένες αλλαγές σε ένα υπάρχον πλοίο όπως η μεταποίηση γάστρας, η μεταβολή του DWT και η αλλαγή κινητήριας διάταξης είναι επιλογές που είναι οικονομικά ασύμφορες. Αυτό οδηγεί τις πλοιοκτήτριες εταιρίες σε δύο στρατηγικές, η μία είναι η πρόωρη απόσυρση του πλοίου και η άλλη είναι μικρές μετατροπές ενεργειακής αποδοτικότητας που ισορροπούν το ισοζύγιο κόστους επένδυσης και συμμόρφωσης με τα όρια του EEXI. Η βασικότερη και ευκολότερη στην εφαρμογή της επιλογή είναι αυτή του περιορισμού της ισχύος του κινητήρα (Engine Power Limitation – εξής EPL).

2.5.1 Η μέθοδος EPL ως εργαλείο συμμόρφωσης με τον EEXI

Για να γίνει κατανοητό τι συνεπάγεται η μέθοδος EPL, πρέπει να γίνουν κάποιες αποσαφηνίσεις των επίσημων όρων που αφορούν την ισχύ σε ένα πλοίο. Με τον όρο “Engine Power” εννοούμε την μηχανική ισχύ που μεταδίδεται από την μηχανή του πλοίου (Main Engine) στον άξονα της προπέλας (Propeller Shaft) . Στην περίπτωση που υπάρχουν παραπάνω από μία μηχανές στο πλοίο, ως Engine Power ορίζεται το άθροισμα της ισχύς που μεταφέρει κάθε μηχανή στον άξονα της κάθε προπέλας. Η ισχύς αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με την ισχύ του άξονα της προπέλας (Shaft Power), που εκφράζει την μηχανική ισχύ που μεταδίδεται από τον άξονα της προπέλας στην φτερωτή της προπέλας (Walker et.al, 2019).

Ένα σύστημα EPL λοιπόν, είναι ένα εγκεκριμένο σύστημα που περιορίζει την μέγιστη ισχύ του κινητήρα ενός πλοίου και μπορεί να παρακαμφθεί μόνο από τον καπετάνιο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης στην θάλασσα. Υπάρχουν διαφορετικά συστήματα EPL ανάλογα με το αν η μηχανή είναι μηχανικά ή ηλεκτρονικά

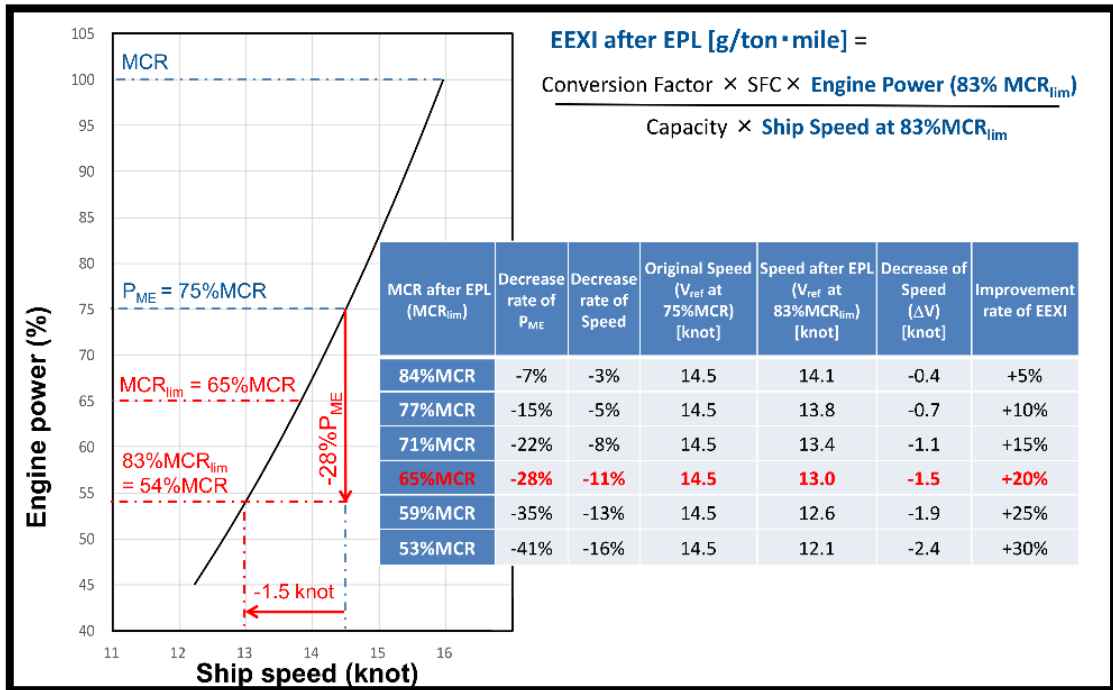
ελεγχόμενη. Για την μηχανικά ελεγχόμενη μηχανή, απαιτείται απλά μία συσκευή σφραγίσματος (Sealing Device), μία βίδα (Stop Screw) δηλαδή που τοποθετείται έτσι ώστε να περιορίζει την ροή του καυσίμου (Εικόνα 13). Αυτή η βίδα πρέπει να είναι συνδεδεμένη με ένα σύστημα χειρισμού ώστε να διασφαλίζεται ότι μπορεί να παρακαμφθεί μόνο από τον καπετάνιο. Στην περίπτωση που η μηχανή είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενη, τότε χρειάζεται να αντικατασταθεί το fuel index limiter του πλοίου με ένα καινούριο, από το οποίο ο καπετάνιος μπορεί να ρυθμίζει ηλεκτρονικά τον περιορισμό της ισχύος του πλοίου από μία οθόνη (Rutherford et.al, 2020)



Εικόνα 13 Η εφαρμογή ενός μηχανικού συστήματος EPL (IMO,2021)

Όπως έχει ειπωθεί παραπάνω, για τον υπολογισμό του EEXI, ο παράγοντας της ισχύος της κύριας μηχανής P_{me} υπολογίζεται στο 75% του MCR. Σύμφωνα με τον IMO (MEPC 76, Annex 9, 2021), στην περίπτωση που ένα πλοίο πιστοποιηθεί ότι χρησιμοποιεί μια διάταξη EPL, στον τύπο υπολογισμού του EEXI πλέον λαμβάνεται η περιορισμένη ισχύς P_{MElim} και υπολογίζεται στο 83% του MCR_{lim} . Όπως ειπώθηκε παραπάνω, η ταχύτητα V_{ref} του πλοίου προκύπτει από τις καμπύλες Ισχύος-Ταχύτητας. Για να γίνει κατανοητό το πόσο δύναται να επηρεάσει την τιμή του EEXI μία μείωση της αρχικής ισχύος του πλοίου κατά 23% με την χρήση EPL, είναι χρήσιμο το διάγραμμα και ο Πίνακας της Εικόνας 14. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι αυτή η μείωση της ισχύος του πλοίου ($P_{MElim} = 28\%P_{ME}$), μειώνει την ταχύτητα V_{ref} κατά 11% ή 1.5 knots βάσει του γραφήματος ($V_{ref_lim} = 89\% V_{ref}$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα λόγω των διαφορετικών τιμών P_{MElim} και V_{ref_lim} που μπαίνουν στην εξίσωση (όπως

φαίνεται από την Εικόνα 14), η τιμή του EEXI του πλοίου να βελτιώνεται κατά 20%. Μπορεί στην εν λόγω Εικόνα να φαίνεται ότι περεταίρω περιορισμός της αρχικής ισχύος (πχ. 35% της P_{ME}) θα βελτιώνει ακόμα περισσότερο το EEXI, παρόλα αυτά μία τόσο μεγάλη μείωση της ισχύος ενός πλοίου δεν είναι δόκιμη τακτική και ενδεχομένως να απορριφθεί από τους νηογνώμονες λόγω της επικινδυνότητας που υπάρχει για το πλοίο και την ζωή του πληρώματος σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (ClassNK,2021)

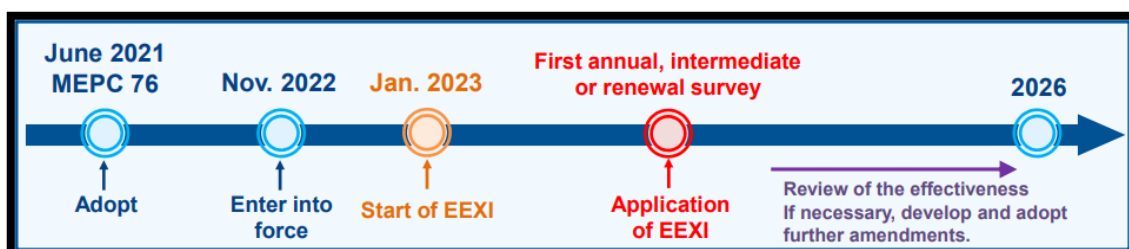


Εικόνα 14 Σενάριο χρήσης EPL και τα αποτελέσματα στην τιμή του EEXI

Πέρα από την πολύ συμφέρουσα και οικονομική επιλογή του EPL, υπάρχουν και άλλες επιλογές όπως να αυξηθεί το DWT του πλοίου. Αυτή η πρακτική έχει λογικό αντίκρισμα, εφόσον το DWT βρίσκεται στον παρονομαστή της εξίσωσης υπολογισμού του EEXI, και άρα η αύξηση του θα σήμαινε χαμηλότερο EEXI άρα αποδοτικότερο πλοίο. Κάτι τέτοιο όμως σπάνια αποτελεί πραγματικά συμφέρουσα λύση διότι αρχικά το κόστος μετασκευής ενός πλοίου ώστε να αυξηθεί η μεταφορική του ικανότητα είναι πολύ μεγάλο, ενώ σε πολλές περιπτώσεις είναι μηχανολογικά και ναυπηγικά ανέφικτο (Wiliyan, et.al, 2023). Επίσης μία αύξηση του DWT αυτομάτως κάνει αυστηρότερο το Required EEDI, άρα αυτομάτως η επιλογή αυτή γίνεται ασύμφορη.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι το EPL είναι η αποδοτικότερη τακτική μείωσης του EEXI ενός πλοίου καθώς με πολύ μικρό κόστος επένδυσης και χωρίς μεγάλες μετασκευές, δύναται να βελτιώσει την τιμή του EEXI κατά 20%.

Το μέτρο του EEXI είναι πολύ πρόσφατο για να μπορέσει να αξιολογηθεί τόσο η δυνατότητα καθολικής εφαρμογής του όσο και το πόσο εν τέλει θα συνδράμει στην επίτευξη των ενεργειακών στόχων του IMO. Όπως φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 15, ενώ όπως είπαμε ανακοινώθηκε στην MEPC 76 το 2021, η εφαρμογή του ξεκίνησε μόλις τον Γενάρη του 2023. Στην σημερινή δηλαδή κατάσταση του 2024 θα γίνουν οι πρώτες επιθεωρήσεις των μετασκευών που έγιναν στο πλαίσιο της συμμόρφωσης των πλοίων. Το 2026 είναι προγραμματισμένο από τον IMO να ενταχθεί στην MEPC που θα συνταχθεί τότε, το θέμα της αποτίμησης του μέτρου του EEXI. Εκεί θα αποφασιστούν και οι διορθώσεις που ενδεχομένως να χρειάζεται το μέτρο αυτό και θα συζητηθούν οι μελλοντικές προεκτάσεις.

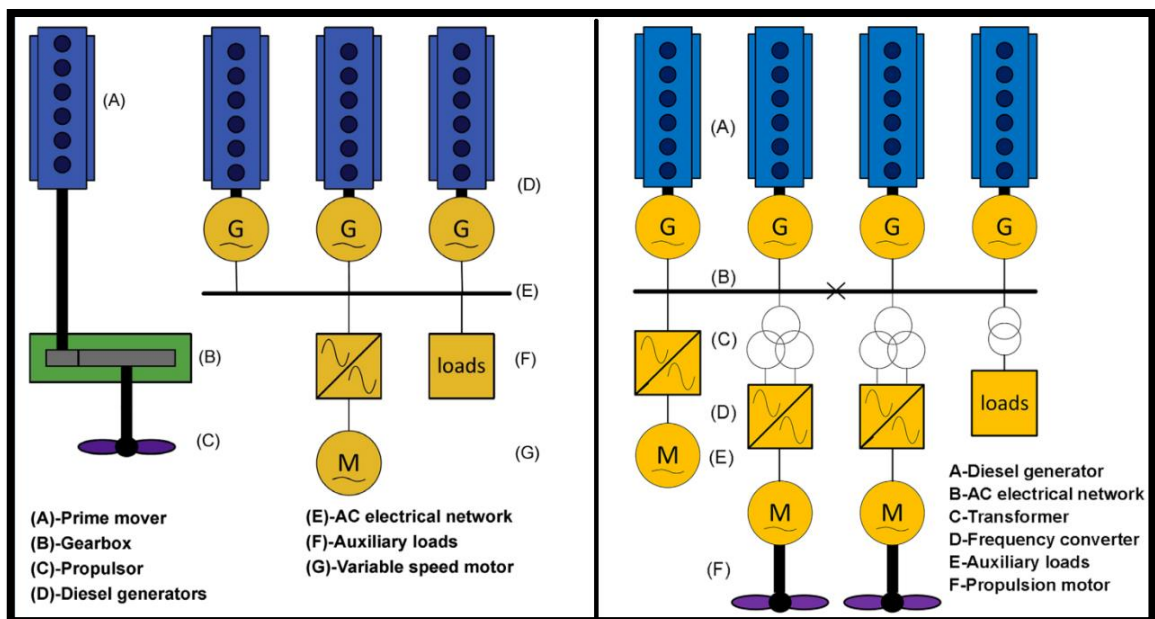


Εικόνα 15 Η πορεία της εφαρμογής του EEXI από το 2021 έως σήμερα (ClassNK, 2021)

2.6 Η Ηλεκτροπρόωση ως μέσο για αποδοτικότερα πλοία.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω οι δείκτες EEDI και EEXI δεν έχουν σχεδιαστεί ώστε να εφαρμόζονται σε πλοία που χρησιμοποιούν μη συμβατικές μεθόδους πρόωσης. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι καινοτόμες μέθοδοι πρόωσης των πλοίων εξαιρούνται από την κουβέντα όταν γίνεται έρευνα για την βελτιστοποίηση της σχεδιαστικής αποδοτικότητας των πλοίων. Αντιθέτως, η ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων πρόωσης πέραν των παραδοσιακών μεθόδων είναι μονόδρομος για την επίτευξη των στόχων του IMO. Κυριότερη εναλλακτική μέθοδος πρόωσης είναι η Ηλεκτροπρόωση.

Για να γίνει σαφής ο ορισμός της Ηλεκτροπρόωσης πρέπει πρώτα να εξεταστεί η συμβατική, μηχανική πρόωση κατά την οποία μία (ή περισσότερες) μηχανή ντίζελ (diesel engine), ή κινεί απευθείας (ή μερικές φορές μέσω μειωτήρα- reduction gear) τον άξονα του πλοίου, την προπέλα δηλαδή, και έτσι δημιουργείται η προωστήρια ροπή. Για αυτό και αυτή η μηχανή αναφέρεται ως prime mover. Η ειδοποιός διαφορά της συμβατικής με την ηλεκτρική πρόωση είναι ότι στην δεύτερη, τον ρόλο του prime mover αναλαμβάνουν κάποιες ηλεκτρογεννήτριες, συνήθως σε ζεύγη. Οι γεννήτριες μέσω ενός συστήματος διανομής καταφέρνουν να εξυπηρετούν όλα τα είδη φορτίων του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου και του φορτίου πρόωσης. Οι γεννήτριες του πλοίου δηλαδή, τροφοδοτούν ηλεκτρικούς κινητήρες οι οποίοι είναι τελικώς οι προωστήριες μηχανές του πλοίου αφού εκείνοι κινούν τις προπέλες. Όπως φαίνεται και από την παρακάτω Εικόνα 16, οι γεννήτριες στην συμβατική πρόωση μέσω ενός AC δικτύου μετάδοσης τροφοδοτούν τα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, και μέσω μετατροπέων συχνότητας να τροφοδοτούν τα βοηθητικά μέσα πρόωσης (όπως τα Thrusters). Αντίθετα οι γεννήτριες σε ένα πλοίο με Ηλεκτροπρόωση εξυπηρετούν και τα 3 είδη φορτίων (ηλεκτρικά φορτία, κύρια φορτία πρόωσης, βοηθητικά φορτία πρόωσης) μέσω ενός ενοποιημένου δικτύου παραγωγής και διανομής ενέργειας.



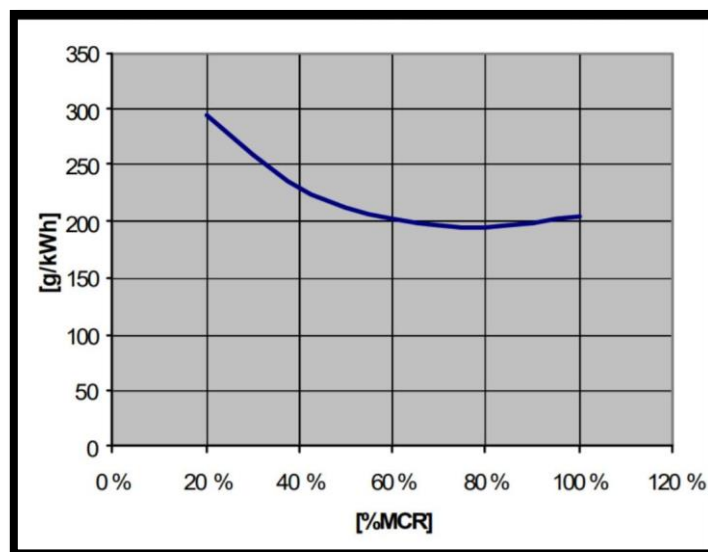
Εικόνα 16 Διάταξη συμβατικής (Αριστερά) και ηλεκτρικής (Δεξιά) πρόωσης (Nguyen, et.al. 2020)

2.6.1 Σχεδιαστικά Πλεονεκτήματα Ηλεκτροπρόωσης

Συγκεκριμένα, τα εφαρμοζόμενα συστήματα Ηλεκτροπρόωσης επιτρέπουν την συνεχή μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0%-100%, δυνατότητα που συμβάλει στην εξοικονόμηση καυσίμου αλλά και στην γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης (dynamic positioning) του σκάφους. Το τελευταίο όσο και αν φαίνεται ασήμαντο, είναι μια πολύ ωφέλιμη δυνατότητα των σύγχρονων πλοίων καθότι περιορίζεται ο κίνδυνος ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενοπλοίων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους ελιγμούς (maneuvering) και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους στα λιμάνια. Η πρωτοφανής αυτή ευελιξία των ηλεκτροκίνητων πλοίων μειώνει επίσης την ανάγκη χρήσης ρυμουλκών σκαφών κατά την είσοδο τους στο λιμάνι και την δυναμική τοποθέτηση τους, γεγονός που επίσης συμβάλει στην μείωση των απαιτούμενων καυσίμων, καθώς παλαιότερα, σε μεγάλα πλοία με συμβατική πρόωση χρειαζόντουσαν 2 ή και 3 σκάφη να τα βοηθήσουν. Τα πλεονεκτήματα φυσικά της Ηλεκτροπρόωσης δεν περιορίζονται σε αποφυγή ατυχημάτων και εξοικονόμηση μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις αλλά σε όλες τις φάσεις και τις καταστάσεις της καθημερινής λειτουργίας του πλοίου (Vicenzutti et.al 2015).

Στην ηλεκτρική εγκατάσταση της πλειοψηφίας των πλοίων σήμερα υπάρχουν με 3 γεννήτριες εκ των οποίων η μία συνήθως είναι σε εφεδρεία αλλά και 2 ή και παραπάνω κινητήρες πρόωσης, γεγονός που προσφέρει πολλά παραπάνω στο πλοίο από εφεδρεία και εξασφάλιση διαρκούς λειτουργίας. Συγκεκριμένα αυτή η ευελιξία σχεδίασης των πλοίων επιτρέπει την επιλογή μηχανών ντίζελ μικρής ισχύος έτσι ώστε να φορτίζονται κατάλληλα κατά την λειτουργία τους αποδίδοντας καλύτερα. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικόνας 17 μία τυπική μηχανή ντίζελ έχει χαμηλότερη κατανάλωση σε γραμμάρια καυσίμου ανά κιλοβατώρα (g/kWh), όταν είναι φορτισμένη μεταξύ 60% και 100% του μέγιστου φορτίου του (MCR- Max Continuous Rating). Εφόσον η Ηλεκτροπρόωση επιτρέπει την επιλογή του αριθμού και της ισχύος των κινητήρων, είναι δυνατή η βέλτιστη λειτουργία των συστημάτων παραγωγής ενέργειας του πλοίου καθώς το ποσοστό φόρτισης των μηχανών ντίζελ ρυθμίζεται

ανάλογα το εκάστοτε φορτίο με το άνοιγμα ή το κλείσιμο των γεννητριών. Κάτι τέτοιο στα πλοία με συμβατική πρόωση είναι φυσικά αδύνατον καθώς όπως έχουμε δει υπάρχει ένας κινητήριος προωστήρας, άρα είναι αναπόφευκτα υψηλής ισχύος, και σε καταστάσεις χαμηλής φόρτισης (μικρότερες του 50%), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 17 η κατανάλωση του αυξάνεται. Επιπλέον, με την λειτουργία των μηχανών ντίζελ σε όχι βέλτιστο σημείο, όπως συχνά συμβαίνει στα συστήματα συμβατικής πρόωσης, η εσωτερική καύση είναι ατελής απελευθερώνοντας περισσότερο NO_x και SO_x, ενώ μειώνεται αισθητά η ευστάθεια του συστήματος. Τέλος ως αποτέλεσμα των παραπάνω εφόσον οι μηχανές του πλοίου είναι πολλές σε αριθμό και λειτουργούν ιδανικά, εξασφαλίζεται η εφεδρεία και η αξιοπιστία του συστήματος καθώς τα προβλήματα και οι βλάβες περιορίζονται άρα αυξάνεται ο χρόνος ζωής των μηχανημάτων ενώ σε περίπτωση αδυναμίας λειτουργίας μίας μηχανής, το φορτίο καλύπτεται από τις υπόλοιπες χωρίς να σταματήσει η κανονική λειτουργία του πλοίου.



Εικόνα 17 Η καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου μιας μηχανής ντίζελ ανάλογα το ποσοστό φόρτισης (Tran, 2016)

Τα πλεονεκτήματα της Ηλεκτροπρόωσης δεν σταματούν εδώ καθώς, παρέχεται στους κατασκευαστές σημαντική ευελιξία στον σχεδιασμό και την τοποθέτηση του προωστήριου συστήματος που προσφέρει ποικιλία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου, ενώ η τοπολογική αυτή ελευθερία επιτρέπει την μελέτη για χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών. Συγκεκριμένα η διάταξη των συστημάτων Ηλεκτροπρόωσης μπορούν να περιοριστούν στην πρύμνη

του πλοίου, καθώς δεν υπάρχει σύζευξη μέσω ενός μεγάλου άξονα αλλά μέσω καλωδίων που είναι εύκαμπτα, ενώ στα συμβατικά συστήματα πρόωσης το μήκος του άξονα της προπέλας δεσμεύει πολύ μεγαλύτερο χώρο. Η ελευθερία αυτή στην τοποθέτηση του προωστήριου εξοπλισμού εξυπηρετεί τις ανάγκες όλων των τύπων πλοίων καθώς για τα εμπορικά πλοία ελευθερώνει χώρο για επιπλέον φορτίο, στα πολεμικά πλοία επιτρέπει την πιο αποδοτική τοποθέτηση οπλικών συστημάτων και διάφορων ηλεκτρικών συσκευών ενώ για τα μεγάλα κρουαζιερόπλοια εξοικονομείται πολύτιμος χώρος για τον σχεδιασμό χώρων εστίασης και ψυχαγωγίας για την τέλεση άλλων λειτουργιών όπως η αποβολή λυμάτων (Sadr, S., & Khanzade, H. 2013)

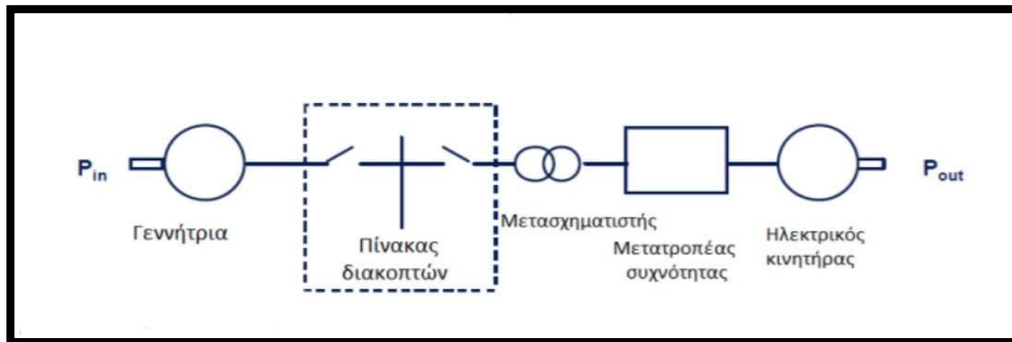
2.6.2 Μειονεκτήματα Ηλεκτροπρόωσης

Η σύνθεση του συστήματος Ηλεκτροπρόωσης μπορεί όπως αναλύθηκε να προσφέρει οικονομία και ευελιξία στην σχεδίαση και τοποθέτηση του, όμως ακριβώς λόγω της σύνθεσης του επιφέρει επιπλέον απώλειες, σε σχέση με την συμβατική μηχανική πρόωση (Nikolopoulos & Boulougouris, 2020). Όπως έχει ήδη αναλυθεί, αλλά και φαίνεται στην Εικόνα 18, η ισχύς που εισάγεται από τον κινητήρα ντίζελ στην γεννήτρια (P_{in}) διανύει μία διαδρομή από διατάξεις που ανάλογα του συντελεστή απόδοσής τους προκαλούν απώλειες ισχύος P_{loss} . Στην έξοδο του ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης η τελική τιμή της ισχύος που μεταδίδεται στην προπέλα είναι P_{out} , και φυσικά ισχύει το ισοζύγιο ισχύος $P_{in} = P_{out} + P_{loss}$. Οι αποδόσεις των μερών της Εικόνας 18 είναι οι εξής:

- Για την γεννήτρια: $\eta = 0,95-0,97$
- Για τον πίνακα διακοπών: $\eta = 0,999$
- Για τον μετασχηματιστή: $\eta = 0,99-0,995$
- Για τον μετατροπέα συχνότητας: $\eta = 0,98-0,99$
- Για τον ηλεκτρικό κινητήρα: $\eta = 0,95-0,97$

Γίνεται αντιληπτό ότι στο σύγχρονο σύστημα Ηλεκτροπρόωσης η απόδοση κυμαίνεται από 0.88 έως 0.92, δηλαδή οι απώλειες κυμαίνονται γύρω στο 10% ανάλογα πάντα με τα στοιχεία που παρεμβάλλονται μεταξύ της παραγωγής ισχύος (Ζεύγος Κινητήρα-Γεννήτριας) και της κατανάλωσης (Ηλεκτρικός Κινητήρας Πρόωσης). Η ισχύς που χάνεται στα μέρη μεταξύ του άξονα της μηχανής ντίζελ και

του άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα είναι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες που παράγουν θερμότητα και αυξάνουν την θερμοκρασία στον εξοπλισμό και στο περιβάλλον του σκάφους. Στο αντίστοιχο σύστημα μηχανικής πρόωσης γνωρίζουμε ότι μεταξύ της προπέλας και του κινητήρα πρόωσης δεν παρεμβάλλεται τίποτα, και κατά συνέπεια οι απώλειες στο σύστημα είναι πολύ μικρές αφού η απόδοση υπολογίζεται 0.97-0.98.



Εικόνα 18 Το μονογραμμικό διάγραμμα της διαδρομής της Ισχύος από την γεννήτρια στον κινητήρα πρόωσης

Τα παραπάνω συστήματα αυτά που υποχρεωτικά εισάγονται στο πλοίο δημιουργούν και άλλα προβλήματα πέραν των απωλειών που προκαλούν. Ο νέος αυτός ηλεκτρικός εξοπλισμός απαιτεί αναθεωρημένες στρατηγικές διαχείρισης και συντήρησης, ενώ φέρνει νέες απαιτήσεις στην επάνδρωση του προσωπικού που ασχολείται με αυτόν τον τομέα ή υποχρεωτική επιμόρφωση του υπάρχοντος προσωπικού προκειμένου να μάθει να δουλεύει με τα νέα στοιχεία. Επιπλέον ο μεγάλος αριθμός συσκευών, διατάξεων και υποσυστημάτων που απαιτεί η Ηλεκτροπρόωση αυξάνει την πιθανότητα σφαλμάτων και βλαβών που επιδρούν αρνητικά στην ορθή λειτουργία του πλοίου και έχει φυσικά οικονομικό αντίκτυπο.

Μιας και αναφέρθηκε το οικονομικό κομμάτι είναι σημαντικό να τονιστεί ότι λόγω της πολυπλοκότητας και του μεγάλου μεγέθους σε όγκο και ισχύ, η ηλεκτρολογική εγκατάσταση των πλοίων με συστήματα ηλεκτροπρόωσης αντιστοιχεί σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της συνολικής δαπάνης για την κατασκευή του πλοίου. Συγκεκριμένα το κόστος αρχικής επένδυσης στα ηλεκτρικά συστήματα του πλοίου ποικίλει ανάλογα τον τύπου του πλοίου από 7% έως 15%, και το ποσοστό αυτό δύναται να αυξηθεί στο μέλλον λόγω της διαρκούς αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου αλλά και των νέων τεχνολογιών που εφαρμόζονται.

Τέλος, το σημαντικότερο πρόβλημα της ηλεκτροπρόωσης είναι τα προβλήματα ποιότητας ισχύος που δημιουργούν τα σφάλματα από χειρισμούς ή μη, καθώς και οι πολυπληθείς διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος στο δίκτυο που όπως έχει ήδη ειπωθεί αλλά και θα αναλυθεί σε παρακάτω ενότητα, είναι απαραίτητες για την αλλαγή της συχνότητας και την ανόρθωση της τάσης στα συστήματα πρόωσης. Συγκεκριμένα οι αρμονικές τάσης και ρεύματος αφενός προσαυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Έτσι ο “ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος” που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις –πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Kumar & Zare,2019).

Συμπερασματικά για την ηλεκτροπρόωση, είναι ξεκάθαρη η υπεροχή της έναντι της συμβατικής πρόωσης αφενός λόγω των πλεονεκτημάτων που αναλύθηκαν, αφετέρου λόγω του εναύσματος που δίνει για ολικό εξηλεκτρισμό των πλοίων. Παρόλα αυτά, λόγω των μειονεκτημάτων που αναλύθηκαν αλλά και τις ελλείψεις που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην διαθέσιμη τεχνολογία η ηλεκτροπρόωση δεν εφαρμόζεται ακόμη ευρέως. Παρόλα αυτά, όπως αναλύθηκε σε αυτή την ενότητα, αδιαμφισβήτητα προσφέρει σχεδιαστικά πλεονεκτήματα που δύναται να βελτιώσουν την αποδοτικότητα των μελλοντικών πλοίων.

Με την ανάλυση της ηλεκτροπρόωσης ως μελλοντική σχεδίαση της προωστήριας εγκατάστασης των πλοίων κλείνει η ανάλυση των σχεδιαστικών παραγόντων που δύναται να βελτιστοποιήσουν την αποδοτικότητα των σύγχρονων πλοίων. Αναλύθηκαν οι σχεδιαστικοί δείκτες που αντανακλούν τα τωρινά επίπεδα σχεδιαστικής αποδοτικότητας των πλοίων και παρουσιάστηκαν οι επικρατέστερες μέθοδοι ώστε τα πλοία του άμεσου μέλλοντος να είναι αποδοτικότερα by design.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα ακολουθηθεί η ίδια τακτική, αλλά για τους παράγοντες αποδοτικότητας που αφορούν τον πλου. Θα εξεταστεί το λειτουργικό (operational) κομμάτι των πλοίων και θα ερευνηθούν οι λειτουργικοί δείκτες που αντανακλούν την πραγματική αποδοτικότητα ενός πλοίου. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι τρόποι με τους οποίους θα πρέπει να βελτιωθεί η λειτουργία των πλοίων έτσι ώστε να έχουν μέγιστη αποδοτικότητα που θα τους επιτρέψει να συμμορφώνονται με τα όρια των δεικτών. Η αρχή θα γίνει με την παρουσίαση του λειτουργικού δείκτη CII που κάνει μια άμεση συσχέτιση του αποτυπώματος του πλοίου σε άνθρακα σε σχέση με την δραστηριότητα του, δηλαδή το μεταφορικό του έργο.

3. Παράμετροι Βελτιστοποίησης Πλου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι τρόποι με τους οποίους τα καινούρια και τα υπάρχοντα πλοία αξιολογούνται βάσει της σχεδιαστικής τους απόδοσης με την χρήση δεικτών. Ερευνήθηκε επίσης και το πως δύναται τα πλοία να γίνουν σχεδιαστικά αποδοτικότερα υιοθετώντας καινοτόμες πρακτικές, όπως νέα συστήματα πρόωσης και εναλλακτικά καύσιμα, προκειμένου οι τιμές των σχεδιαστικών δεικτών τους να είναι εντός των επιτρεπτών από τον IMO ορίων.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ακολουθηθεί ακριβώς η ίδια λογική, με την διαφορά ότι η μελέτη θα εστιαστεί στο λειτουργικό (operational) κομμάτι που αφορά την αποδοτικότητα των πλοίων. Συγκεκριμένα θα αναλυθούν οι δείκτες λειτουργικής αποδοτικότητας των πλοίων, οι οποίοι επίσης υπόκεινται σε υποχρεωτικά όρια για τις τιμές τους. Ύστερα, θα παρουσιαστούν οι επικρατέστερες μέθοδοι με τις οποίες θα βελτιώσει τον πλου και έτσι θα καταφέρει να κάνει περιβαλλοντολογικά βιώσιμες τις θαλάσσιες μεταφορές στο μέλλον.

3.1 Ο Δείκτης CII

Με τους σχεδιαστικούς δείκτες για τα καινούρια (EEDI) και τα υπάρχοντα (EEXI) πλοία που ερευνήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε αντιληπτή η αδυναμία αυτών των δεικτών να εξετάζουν την πραγματική αποδοτικότητα των πλοίων όπως επίσης αποδείχτηκε και η αδυναμία εφαρμογής τους σε πλοία που εφαρμόζουν τεχνολογίες όπως μπαταρίες ή υβριδικά συστήματα πρόωσης. Αυτό γιατί οι σχεδιαστικοί δείκτες δεν εστιάζουν στο πως πραγματικά λειτουργεί το πλοίο αλλά στο ποιες είναι οι προδιαγραφές του βάσει σχεδιασμού. Αυτό το κενό το καλύπτει ο IMO με την εισαγωγή λειτουργικών (Operational) δεικτών που μετράνε το πόσο αποδοτικά μεταφέρονται όντως τα προϊόντα από τα πλοία.

Ένας βασικός υποχρεωτικός δείκτης είναι ο Δείκτης Πυκνότητας Άνθρακα (Carbon Intensity Indicator – εξής CII), ο οποίος παρουσιάστηκε στην 76^η MEPC τον Ιούνιο του 2021 και βρίσκεται σε ισχύ από τον Γενάρη του 2023, οπότε στο πρώτο 3μηνο του 2024 αναμένονται οι πρώτες αναφορές από τις ναυτιλιακές εταιρίες.

Ο δείκτης CII επί της ουσίας συνδέει τις πραγματικές εκπομπές CO₂ για την μεταφορά προϊόντων που έγινε μέσω της πραγματικής απόστασης που διανύθηκε από ένα πλοίο. Αυτό γίνεται εφικτό μέσα από την μέτρηση και αναφορά για κάθε πλοίο της ποσότητας καυσίμου που κατανάλωσε κάθε χρόνο. Στα πλαίσια των σχεδιαστικών δεικτών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το κάθε πλοίο έχει κάθε χρόνο μια τιμή Attained CII η οποία συγκρίνεται με μια τιμή βάσης Required CII, όπου:

- $$Attained\ CII_y = \frac{M_y}{W_y}$$

Όπου M_y είναι οι συνολική μάζα των εκπομπών CO₂ για το πλοίο για την χρονιά y και W_y είναι το μεταφορικό έργο του πλοίου για την χρονιά y δηλαδή:

- $$M_y = \sum (G_{y,j} \times C_{Fj})$$
- $$W_y = C \times D_{ty}$$

Όπου $G_{y,j}$ είναι η συνολική μάζα του καυσίμου j που καταναλώθηκε την χρονία y , C_{Fj} ο συντελεστής μετατροπής άνθρακα για το καύσιμο j , C είναι η χωρητικότητα του πλοίου σε DWT και D_{ty} είναι η συνολική απόσταση που διένυσε το πλοίο την χρονιά y . Για να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω ο τύπος υπολογισμού για το CII σε σχέση με την προμήθεια προϊόντων (Supply Based CII) είναι ουσιαστικά:

$$CII_{supply} = \frac{\text{Annual carbon emissions of the ship (g)}}{\text{The ship's deadweight tonnage times the sailing distance in the year}}$$

Η τιμή βάσης Required CII υπολογίζεται ως εξής:

$$Required\ CII_y = \left(1 - \frac{z_y}{100}\right) \times CII_{ref}$$

Όπου z_y είναι ο παράγοντας μείωσης για την χρονιά y σε σχέση με την τιμή βάσης του 2019, και CII_{ref} είναι η τιμή βάσης που για το κάθε πλοίο υπολογίζεται ως εξής:

$$CII_{ref} = aCapacity^{-c}$$

Οι παράγοντες a και c εξαρτώνται από τον τύπο και το DWT του κάθε πλοίου, και οι τιμές τους για τους κυριότερους τύπους πλοίων φαίνονται παρακάτω στην Εικόνα 19.

Ship type		Capacity	a	c
Bulk carrier	279,000 DWT and above	279,000	4745	0.622
	less than 279,000 DWT	DWT	4745	0.622
Gas carrier	65,000 and above	DWT	14405E7	2.071
	less than 65,000 DWT	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container ship		DWT	1984	0.489
General cargo ship	20,000 DWT and above	DWT	31948	0.792
	less than 20,000 DWT	DWT	588	0.3885
Refrigerated cargo carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	5119	0.622
LNG carrier	100,000 DWT and above	DWT	9.827	0.000
	65,000 DWT and above, but less than 100,000 DWT	DWT	144779E10	2.673
	less than 65,000 DWT	65,000	14479E10	2.673

Εικόνα 19 Οι τιμές των παραγόντων a και c ανάλογα τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου (IMO, 2019)

Με την σύγκριση του Attained CII του κάθε πλοίου με το Required CII, το κάθε πλοίο λαμβάνει μια βαθμολογία από το A (ανώτερο επίπεδο) έως το E (κατώτερο επίπεδο). Η οριοθέτηση κάθε χρόνο των ορίων των επιπέδων αυτών ορίζεται ως εξής:

$$\begin{cases} \text{superior boundary}_y = \exp(d_1) \cdot \text{required CII}_y \\ \text{lower boundary}_y = \exp(d_2) \cdot \text{required CII}_y \\ \text{upper boundary}_y = \exp(d_3) \cdot \text{required CII}_y \\ \text{inferior boundary}_y = \exp(d_4) \cdot \text{required CII}_y \end{cases}$$

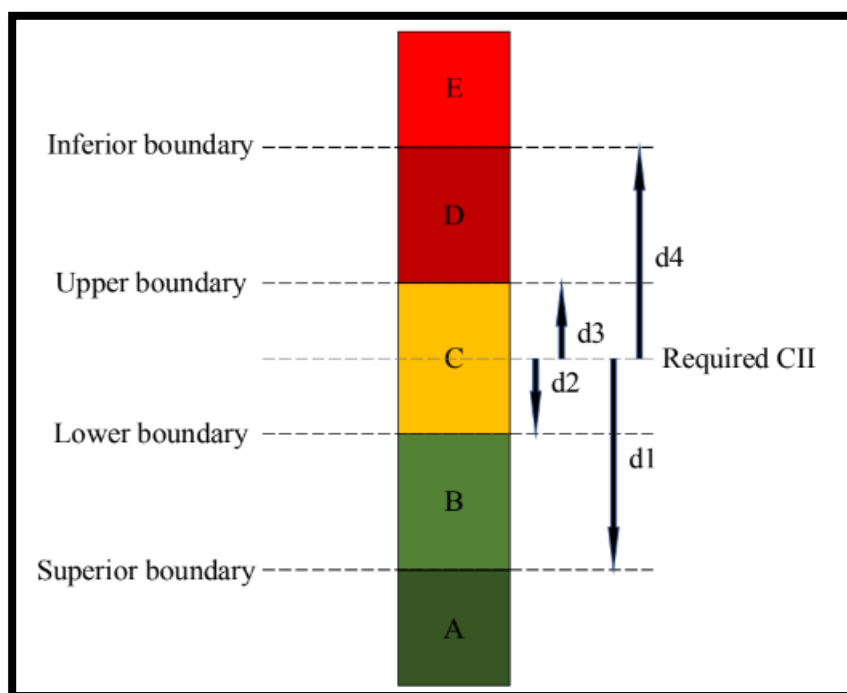
Συνεπώς οι τιμές του Attained CII συγκρίνονται με τις τιμές των ορίων των επιπέδων και κατατάσσονται το κάθε πλοίο εκεί που ανήκει όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 (Sun, et.al, 2023)

CII rating and value range of the attained CII in a given year y.	
CII Rating	Value range of the attained CII in a given year y
rating A	$\text{attained CII}_y \leq \text{superior boundary}_y$
rating B	$\text{superior boundary}_y < \text{attained CII}_y \leq \text{lower boundary}_y$
rating C	$\text{lower boundary}_y < \text{attained CII}_y \leq \text{upper boundary}_y$
rating D	$\text{upper boundary}_y < \text{attained CII}_y \leq \text{inferior boundary}_y$
rating E	$\text{attained CII}_y > \text{inferior boundary}_y$

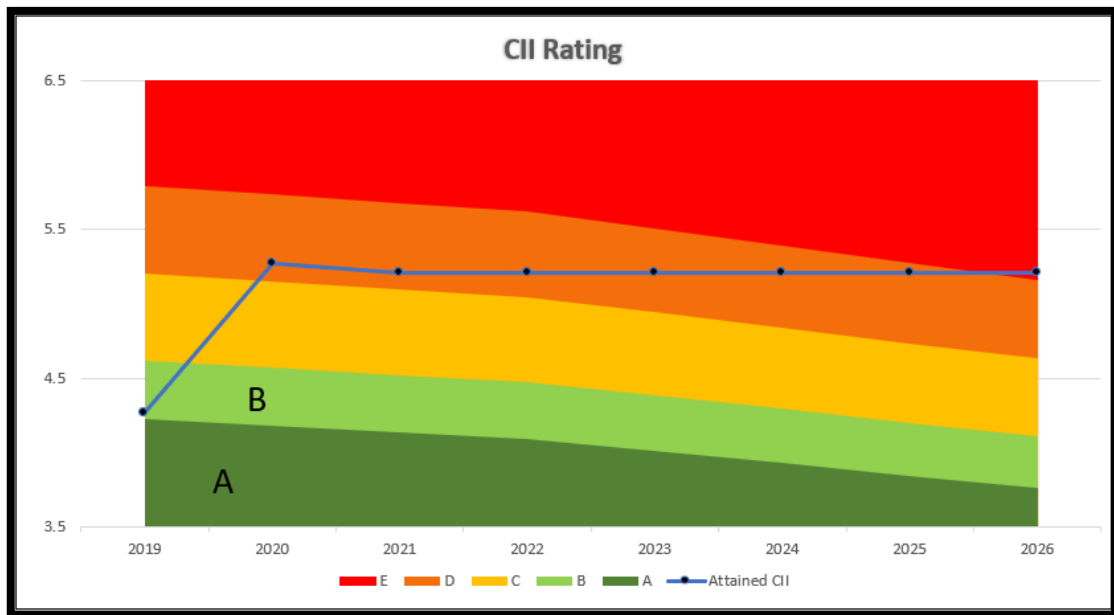
Εικόνα 20 Οι συγκρίσεις του Attained CII με τα όρια των επιπέδων (Sun, et.al 2023)

Τα επίπεδα A, B και C (Εικόνα 21), εξασφαλίζουν την συμμόρφωση του πλοίου με τον κανονισμό του CII, ενώ το αντίθετο ισχύει για πλοία που βρίσκονται για 3 συνεχόμενες χρονιές στο επίπεδο D ή για μία χρονιά στο επίπεδο E. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να γίνουν κάποιες δραστικές αλλαγές στον τρόπο που λειτουργεί το πλοίο ώστε να επιστρέψει σε επιτρεπτά επίπεδα CII. Οι ενέργειες για αύξηση της αποδοτικότητας όμως δεν είναι μέλημα μόνο των πλοίων που δεν έχουν το επιθυμητό σκορ, καθώς και τα πλοία που την δεδομένη χρονιά έχουν σκορ εντός των επιτρεπτών ορίων αν δεν αυξήσουν την παραγωγικότητα τους σε βάθος χρόνου θα βρεθούν και εκείνα εκτός συμμόρφωσης με τον κανονισμό.

Αυτό συμβαίνει διότι όπως εξηγήθηκε και παραπάνω η τιμή βάσης του Required CII κάθε χρόνο γίνεται όλο και αυστηρότερη. Αυτό επαληθεύεται από το παράδειγμα της Εικόνας 22 στην οποία φαίνεται ότι ένα πλοίο που για τις χρονιές 2023-2026 διατήρησε αναλλοίωτη την τιμή του Attained CII, ενώ το 2023 βρίσκεται στο επίπεδο D, μέχρι το 2026 θα βρίσκεται στο επίπεδο E. Παρόλο που το ποσοστό αυστηροποίησης των τιμών βάσεων δεν έχουν ανακοινωθεί ακόμη οι εκτιμήσεις ορίζουν 1% για το 2024 και 2% για τα επόμενα έτη (Wang et al. 2021)



Εικόνα 21 Τα επίπεδα του CII (Zincir, 2023)



Εικόνα 22 Η πορεία του rating ενός πλοίου που διατηρεί το ίδιο Attained CII (Wang et al. 2021)

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως βάσει του τύπου υπολογισμού του CII, απαιτείται βελτιστοποίηση του τρόπου που το πλοίο λειτουργεί και ταξιδεύει. Πρόκειται δηλαδή για την αναζήτηση ενεργειακών μέτρων που θα οδηγήσουν σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά την διάρκεια του ταξιδιού αλλά και γενικότερα στην καθημερινή λειτουργία του πλοίου ακόμα και όταν δεν ταξιδεύει. Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, σημαίνει αυτομάτως και λιγότερες εκπομπές CO₂ άρα, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, βελτίωση του CII του πλοίου. Επειδή όμως η επιλογή αυτών των μέτρων για το κάθε πλοίο δεν είναι απλοϊκή υπόθεση, παρακάτω θα αναλυθεί ο τρόπος που οργανώνονται και παρακολουθούνται τα σχέδια εξοικονόμησης ενέργειας πλοίων από τις ναυτιλιακές εταιρείες, και ποιες είναι οι προσδοκίες για το μέγεθος της εξοικονόμησης αυτής το μέλλον.

3.2 Ο δείκτης ΕΕΟΙ

Στο ίδιο πλαίσιο με όλες τις αποφάσεις του IMO που έχουν εξηγηθεί σε άλλα κεφάλαια, κατά την 59 MEPC (13-17 Ιουλίου 2009), προτείνει τον Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας Λειτουργίας του πλοίου (Ship Energy Efficiency Operational Index, - εξής ΕΕΟΙ).

Πρόκειται για ένα εθελοντικό μέτρο που έχει εφαρμογή σε όλα τα πλοία και σκοπό να μειώσει τις εκπομπές CO₂ ανά ταξίδι. Σε αντίθεση με τον EEDI, που όπως ειπώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο καθορίζεται από το στάδιο της σχεδίασης του πλοίου, ο EEOI καθορίζεται κατά την πλεύση του πλοίου ανάλογα με την αποδοτικότητα του πλοίου. Στόχος είναι μέσω της χρήσης αυτού του δείκτη οι εμπλεκόμενοι στις Ναυτιλιακές επιχειρήσεις να αξιολογούν την αποδοτικότητα της λειτουργίας των πλοίων τους τόσο σχετικά με τις εκπομπές CO₂ όσο και για την κατανάλωση καυσίμου (εφόσον τα ποσά εκπεμπόμενων αερίων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη και ανάλογη με τα ποσά καυσίμου που καταναλώνονται) (Kokkulunk & Parlak, 2017).

Η έκφραση του EEOI είναι η μάζα CO₂ που εκπέμπεται ανά μονάδα μεταφορικού έργου, και μπορεί να υπολογίζεται σε κάθε ταξίδι (Li et.al, 2014) :

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{cargo} \times D}$$

ή ως μέσος όρος για συγκεκριμένη χρονική περίοδο ή συγκεκριμένα ταξίδια:

$$Average\ EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \times C_{Fj})}{\sum_i (m_{cargo,i} \times D_i)}$$

Όπου:

- j είναι ο τύπος καυσίμου
- i είναι ο αριθμός του ταξιδιού
- FC_{ij} είναι η κατανάλωση του καυσίμου j στο ταξίδι i
- C_{Fj} είναι ο συντελεστής μετατροπής του καυσίμου j σε CO₂
- m_{cargo} είναι η μάζα του φορτίου σε τόνους
- D_i είναι η διανυσθείσα απόσταση σε ναυτικά μίλια στο ταξίδι i.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι ο δείκτης EEOI προτείνεται ως μέτρο ανίχνευσης της πραγματικής αποδοτικότητας ενός πλοίου ή ενός στόλου για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένα ταξίδια. Η τιμή του EEOI, όπως μαρτυρά η εξίσωση υπολογισμού του, εξαρτάται πέραν του είδους του καυσίμου, και από άλλους παράγοντες όπως η συνολική κατανάλωση και η απόσταση που διανύεται για

την μεταφορά συγκεκριμένης μάζας φορτίου (Sun et.al, 2019). Στην παρακάτω ενότητα θα αναλυθεί πως ο δείκτης ΕΕΟΙ, ως συμπληρωματικό και μη υποχρεωτικό μέσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να μετρά την δραστηριότητα των ενεργειακών μέτρων που λαμβάνονται από το πλοίο ώστε να βελτιώσει την λειτουργική αποδοτικότητα του.

3.3 Ανάλυση του SEEMP

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν οι τρόποι με τους οποίους δύναται να μεταβληθεί η πλεύση ενός πλοίου με στόχο την βελτιστοποίηση της ενεργειακής του αποδοτικότητας και την συμμόρφωση με τους κανόνες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Αρχικά, και για να γίνει αντιληπτό το πως υλοποιούνται αυτές οι αλλαγές στην πραγματικότητα, θα πρέπει να γίνει αναφορά στο Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου (Ship's Energy Efficiency Management Plan)

Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου, στο εξής SEEMP, υπαγορεύει τα μέτρα εκείνα που απαιτούνται και ορίζει υπεύθυνους στην θέσπιση, τέλεση και τήρηση τους με σκοπό την ορθή λειτουργική διαχείριση της ενέργειας του πλοίου. Θεσπίστηκε από τον IMO μέσω της 62^{ης} MEPC (Ιούλιος 2011), και είναι ένα υποχρεωτικό μέτρο από την 1 Ιανουαρίου 2013 για κάθε πλοίο πάνω από 400GT. Πρόκειται για το πλέον καθολικά υποχρεωτικό πλάνο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου, το οποίο εφαρμόζεται εξατομικευμένα σε κάθε πλοίο και αποσκοπεί πρώτα στην μέτρηση και στην συνέχεια στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου μέσω της εφαρμογής νέων πρακτικών πλεύσης και τεχνολογιών καθώς και την θέσπιση ορίων (Kaminski,2022).

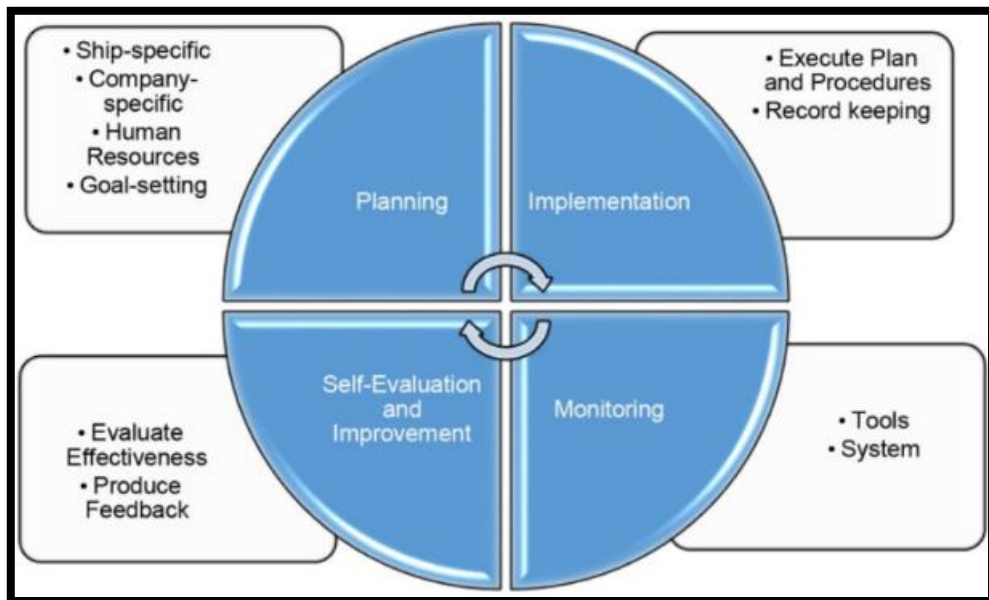
Τα στάδια εφαρμογής του εν λόγω πλάνου συνιστούν μια κυκλική διαδικασία ενδεδειγμένων επαναπροσδιορισμού, διακρίνονται στην Εικόνα 23, και εξέλιξης και είναι τα εξής τέσσερα (Im, et.al, 2018).

- Σχεδιασμός/Προγραμματισμός (Planning) που είναι η αρχική και κρισιμότερη φάση του σχεδίου. Περιλαμβάνει αρχικά την σαφή απεικόνιση της παρούσας

ενεργειακής κατάστασης του πλοίου, και εν συνεχεία της θέσπισης νέων ενεργειακών στόχων. Είναι σημαντικό και οι δύο αυτές μελέτες να γίνουν πολυεπίπεδα, δηλαδή σε επίπεδο πλοίου (τωρινές ενεργειακές ανάγκες, υπάρχουσες πρακτικές εξοικονόμησης, πλάνο βελτίωσης), σε επίπεδο ναυτιλιακής εταιρίας (διαχείριση στόλου, πολιτικές διοίκησης και επενδύτων), καθώς και σε επίπεδο ανθρώπινου δυναμικού (ενημέρωση και εκπαίδευση προσωπικού). Με δεδομένα τα παραπάνω, επιλέγονται για το κάθε πλοίο ένα σύνολο ενεργειακά αποδοτικών μέτρων με σκοπό να επιτευχθούν οι ενεργειακοί στόχοι που έχουν τεθεί.

- Υλοποίηση/Εφαρμογή (Implementation) που αφορά την μελέτη του πώς και πότε θα εφαρμοστούν τα νέα μέτρα, και ποιος θα είναι ο ρόλος και η ευθύνη του καθενός ως προς αυτά. Αφορά επίσης και στην θέσπιση ενός συστήματος καταγραφής των δεδομένων και των αποτελεσμάτων (recordkeeping), το οποίο βοηθάει στα παρακάτω στάδια της αυτοαξιολόγησης και της εις βάθος χρόνου βελτίωση. Γίνεται εύκολα αντιληπτή η σημασία του σταδίου αυτού καθώς απαραίτητη προϋπόθεση στην εφαρμογή οποιονδήποτε μέτρων είναι ο ξεκάθαρος καταμερισμός ευθυνών, το σαφές χρονοδιάγραμμα και η συνεχής καταγραφή των όσων συμβαίνουν σε αυτή την διαδικασία.
- Παρακολούθηση (Monitoring) Αφορά στην σύσταση ενός συστήματος συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής των δεδομένων χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία και δείκτες. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα συγκέντρωσης δεδομένων με την θεμιτή ακρίβεια χωρίς να εκτίθεται το πλήρωμα σε επιπλέον φόρτο εργασίας και στην πιθανότητα λάθος καταμέτρησης. Η ακρίβεια και ο όγκος των δεδομένων είναι τα κύρια ζητούμενα αυτής της διαδικασίας. Για να εξασφαλιστεί αυτό, οι πλοιοκτήτριες εταιρείες χρησιμοποιούν τον λειτουργικό δείκτη ΕΕΟΙ που αναλύθηκε παραπάνω, για να ελέγχει το κατά πόσο ένα ή περισσότερα πλοία έχουν αυξήσει την λειτουργική τους αποδοτικότητα από τα μέτρα που πάρθηκαν.

- Αυτοαξιολόγηση και βελτίωση (Self-evaluation and improvement) Πρόκειται για το στάδιο που κλείνει έναν κύκλο διαχείρισης και ανοίγει έναν καινούριο καθώς δίνει το απαιτούμενο feedback ώστε να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα και να αρχίσει μια νέα διαδικασία planning για μελλοντικούς στόχους. Οι διαδικασίες αυτοαξιολόγησης που υιοθετούνται, βασίζόμενες στα δεδομένα που έχουν συλλεχτεί, δύναται να κρίνουν ποια από τα μέτρα που θεσπίστηκαν ήταν όντως αποτελεσματικά και ποια όχι, τι βελτιώσεις και νέα μέτρα χρειάζονται και ποια ήταν η απόκριση του πληρώματος στην διαδικασία διαχείρισης. Οι διαδικασίες αυτές προτείνεται να εκπονούνται κάθε ένα ή δύο χρόνια και υπεύθυνοι για την σωστή τέλεση τους είναι τα μέλη του management team του πλοίου (Kim et.al, 2020).



Εικόνα 23 Οι φάσεις του SEEMP (Krmek et. al 2021)

Στην παρακάτω ενότητα θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα Ενεργειακά μέτρα που περιλαμβάνονται σε ένα πλάνο SEEMP προκειμένου το πλοίο να γίνει λειτουργικά αποδοτικότερο. Θα παρουσιαστούν οι επικρατέστερες μέθοδοι διαχείρισης ενέργειας και καυσίμου στα σύγχρονα πλοία και θα αναλυθούν τα περιθώρια βελτίωσης της αποδοτικότητας των πλοίων από την υιοθέτηση τους.

3.4 Τα κυριότερα Ενεργειακά μέτρα Βελτιστοποίησης Πλου

Η βελτιστοποίηση ταξιδιού χρησιμοποιείται ως γενικός όρος για να περιγράψει τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν ώστε το πλοίο να ταξιδεύει οικονομικότερα και αποδοτικότερα. Παρόλα αυτά από μόνος του αυτός ο όρος δεν μπορεί να είναι περιγραφικός, καθώς το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ταξιδιού αναλύεται πολύπλευρα και έχει πολλές προεκτάσεις. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι βασικές πτυχές της βελτιστοποίησης ταξιδιού και θα αναλυθεί το πως αυτές συνδράμουν στην αποτελεσματικότερη λειτουργία και πλεύση του πλοίου.

3.4.1 Υπολογισμός Βέλτιστης Διαδρομής (Route Planning)

Μία πτυχή της βελτιστοποίησης ταξιδιού είναι ο καθορισμός της βέλτιστης διαδρομής (Route Planning) η οποία αποτελεί ένα πολυδιάστατο πρόβλημα. Αυτό διότι η βέλτιστη διαδρομή εξαρτάται από παράγοντες που πρέπει να είναι γνωστοί όπως οι καιρικές συνθήκες, η κατάσταση φόρτου και βυθίσματος πλοίου, η επιθυμητή ώρα άφιξης, ο στόχος για περιορισμό κατανάλωσης καυσίμου, και φυσικά η ασφάλεια του φορτίου και του πληρώματος. Όπως γίνεται αντιληπτό, δεν υπάρχει μία διαδρομή η οποία να ευνοεί όλους του παράγοντες ταυτόχρονα. Αντιθέτως, ο καπετάνιος κάθε φορά που καλείται να οδηγήσει ένα πλοίο από το σημείο Α στο σημείο Β, πρέπει να κρίνει ποιόν παράγοντα πρέπει να “θυσιάσει” προκειμένου να εξασφαλισθούν ευνοϊκότερες συνθήκες για έναν άλλο παράγοντα (Zaccone et.al, 2018). Για παράδειγμα, αν η ασφάλεια του φορτίου είναι για κάποιο λόγο κρισιμότερη από την κατανάλωση καυσίμου, ο καπετάνιος θα πρέπει να διαλέξει μια διαδρομή που εξασφαλίζει ευνοϊκότερες καιρικές συνθήκες με λιγότερους ανέμους και κυματισμούς. Έτσι διασφαλίζεται το φορτίο αλλά παραμελείται η κατανάλωση καυσίμου.

Όπως γίνεται αντιληπτό στην σύγχρονη εποχή που οι βάσεις δεδομένων και τα λογισμικά έχουν αναπτυχθεί ευρέως, δεν θα ήταν σε καμία περίπτωση αποδοτικό το να επωμίζεται ένας άνθρωπος για την εύρεση της βέλτιστης λύσης ενός τόσο σύνθετου προβλήματος, και μάλιστα σε κάθε ταξίδι. Αντιθέτως, την δουλειά αυτή αναλαμβάνουν πλέον τεχνολογικά μέσα τα οποία λαμβάνουν σε πραγματικό χρόνο

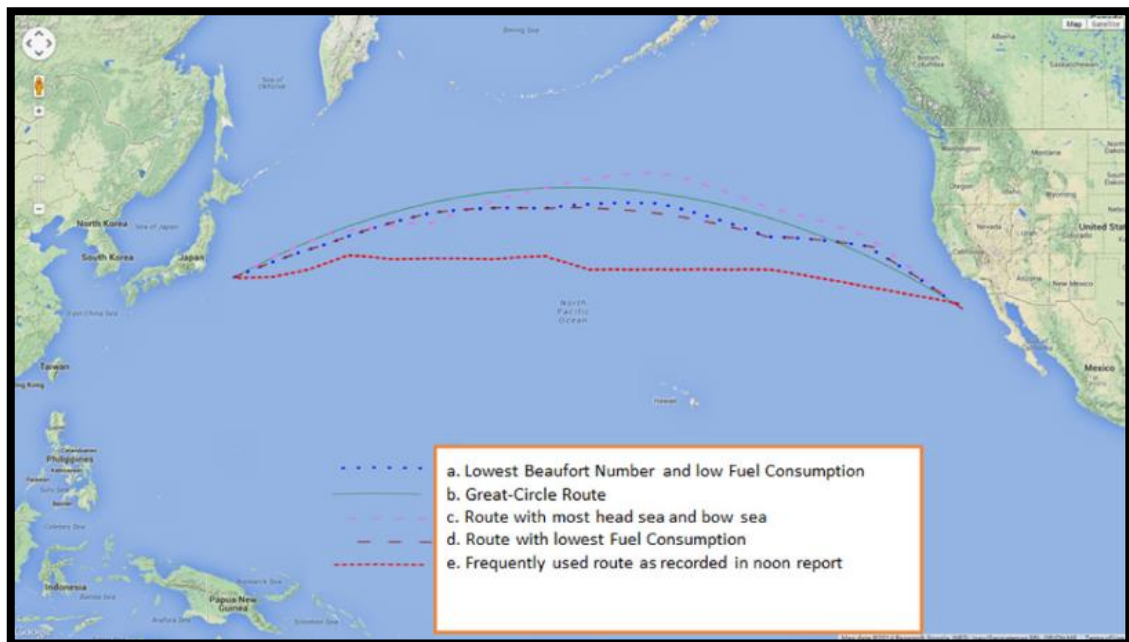
δεδομένα για τις καιρικές συνθήκες και τις γεωγραφικές συντεταγμένες αναχώρησης και άφιξης και παρουσιάζουν προτεινόμενες διαδρομές, και με αυτόν τον τρόπο η αποδοτικότητα ενός πλοίου ή ενός στόλου δύναται να αυξηθεί σημαντικά (Wang et.al, 2015).

Ένα ιδανικό λογισμικό υπολογισμού βέλτιστης διαδρομής ταξιδιού αναλύθηκε από τους Lou et.al (2015), το οποίο δύναται να λαμβάνει υπόψιν όλες τις παραμέτρους που προαναφέρθηκαν, αλλά και να ανακτά δεδομένα από παρεμφερή ταξίδια από παρόμοια πλοία στο παρελθόν. Έτσι έχοντας στοιχεία για τον καιρό, και παίρνοντας δεδομένα της επιθυμητή ώρα άφιξης, και συγκρίνοντας τις παρόμοιες καταστάσεις από την βάση δεδομένων μιας Ναυτιλιακής εταιρείας, παρουσιάζει στον καπετάνιο περισσότερες από μία ιδανικές επιλογές διαδρομής, και αυτός είναι υπεύθυνος να διαλέξει την καταλληλότερη κάθε φορά. Το παράδειγμα της Εικόνας 24 είναι ενδεικτικό καθώς από το μοντέλο παρέχονται 5 διαφορετικές διαδρομές, κάθε μια εκ των οποίων παρέχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και συγκεκριμένα:

- Διαδρομή a: Διαδρομή με τα χαμηλότερα μποφόρ. Μια τέτοια διαδρομή είναι κατάλληλη για την ασφάλεια του φορτίου και του πλοίου, όπως και για εξοικονόμηση καυσίμου αφού η αντίσταση του αέρα στο πλοίο είναι χαμηλότερη.
- Διαδρομή b: Διαδρομή κοντινότερης απόστασης. Αποτελεί την συντομότερη από άποψη χρόνου και ναυτικών μιλίων απόσταση, αφού ακολουθεί την καμπυλότητα της Γης.
- Διαδρομή c: Διαδρομή με περισσότερο μετωπικό κυματισμό (head sea and bow sea). Επιλέγεται σε περιπτώσεις που ο καπετάνιος κρίνει ότι για λόγους ασφαλείας πρέπει να αποφευχθούν πλευρικοί κυματισμοί, παρόλα αυτά δεν είναι μία οικονομική διαδρομή καθώς η αντίσταση κυματισμού στο πλοίο είναι μεγάλη.
- Διαδρομή d: Διαδρομή χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου. Είναι μια επιλογή όταν η ώρα άφιξης δεν είναι σημαντική.
- Διαδρομή e: Η συχνότερη διαδρομή. Πρόκειται για την διαδρομή η οποία βάσει των προηγούμενων αναφορών του πλοίου, αλλά και των υπολοίπων

πλοίων της Ναυτιλιακής, είναι αυτή που έχει επιλεχθεί περισσότερες φορές. Χρησιμοποιείται όταν ο καπετάνιος θέλει να αποφύγει τα ρίσκα και να κάνει μια ισορροπημένη από πλευράς κατανάλωσης-χρόνου διαδρομής.

Ένα τέτοιο τεχνολογικό εργαλείο είναι παραπάνω από χρήσιμο για τον καπετάνιο αλλά και για την εταιρεία γενικότερα και αυτό διότι αφενός εξασφαλίζεται η αποδοτικότερη μετακίνηση του πλοίου αλλά αφετέρου δίνεται η επιλογή στον καπετάνιο να κρίνει ποιος παράγοντας είναι κρισιμότερος (πχ. η ασφάλεια του φορτίου μπορεί να είναι σημαντικότερη από την έγκαιρη ώρα άφιξης) ώστε η επιλογή να είναι κάθε φορά ορθή από άποψη αποδοτικότητας.



Εικόνα 24 Οι επιλογές για την ιδανική διαδρομή ταξιδιού από λογισμικό (Lou et.al, 2015)

3.4.2 Βελτιστοποίηση ταχύτητας (Speed Optimization)

Μία άλλη πτυχή της βελτιστοποίησης ταξιδιού είναι η τακτική της βελτιστοποίησης ταχύτητας (Speed Optimization) με την οποία κινείται το πλοίο κατά την πλεύση του. Είναι σημαντικό, όπως τονίζουν οι Psaraftis & Kontovas (2013) αρχικά να μην συγκρίνεται η ταχύτητα που δύναται να επιλεγεί και να διαμορφωθεί ανάλογα τις συνθήκες για ένα πλοίο, με την σχεδιαστική ταχύτητα (V_{ref}) που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς σχεδιαστικής αποδοτικότητας σε προηγούμενο

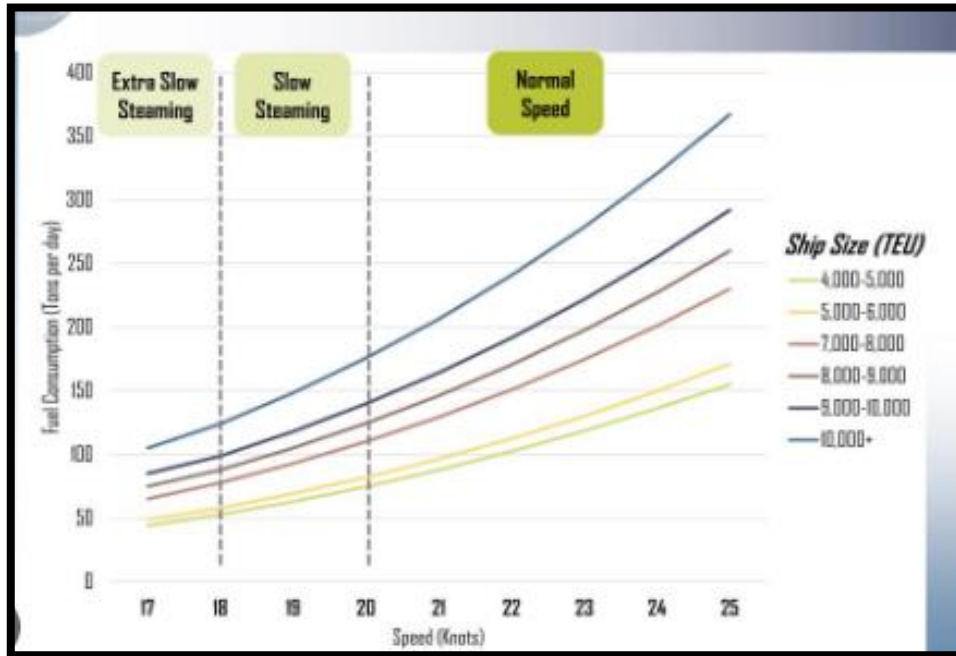
κεφάλαιο. Ο περιορισμός της ταχύτητας δηλαδή δεν έχει να κάνει με τις δυνατότητες του πλοίου με βάση την εγκατεστημένη ισχύ, αλλά για συνειδητή επιλογή του καπετάνιου και της ναυτιλιακής εταιρείας να πλέουν με ταχύτητα χαμηλότερη από αυτή που το πλοίο είναι σχεδιασμένο να πλέει.

Γίνεται αντιληπτό πως η επιλογή της ταχύτητας σχετίζεται με την επιλογή της διαδρομής που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, συνεπώς δεν είναι μια ανάλυση που γίνεται ξεχωριστά. Αντιθέτως, στην επιλογή της ιδανικής ταχύτητας εισάγονται εξίσου πολλοί παράγοντες όπως ο επιθυμητός χρόνος άφιξης, και οι καιρικές συνθήκες (Ancic, Theotokatos & Vladimir 2018). Επίσης είναι σημαντικό να ξεκαθαριστεί ότι όταν γίνεται λόγος για επιλογή βέλτιστης ταχύτητας δεν πρόκειται για μια μοναδική σταθερή ταχύτητα η οποία θα ακολουθηθεί καθ' όλη την διάρκεια της διαδρομής, παρά για τον υπολογισμό μιας βέλτιστης ταχύτητας για κάθε στάδιο του ταξιδιού, η οποία έχει προκύψει λαμβάνοντας υπόψιν πέρα από τον επιθυμητό χρόνο άφιξης και εξωτερικούς παράγοντες που εισάγουν αντίσταση στο πλοίο.

Πρόκειται για παράγοντες που εισάγουν την λεγόμενη involuntary speed loss, δηλαδή την μείωση της ταχύτητας του πλοίου λόγω αντιστάσεων όπως εκείνη του αέρα, ή λόγω κυματισμών. Συνεπώς το λογισμικό που υπολογίζει κάθε φορά την βέλτιστη ταχύτητα του πλοίου πρέπει να είναι ικανό να προβλέψει τις επιπτώσεις που θα έχουν στην ταχύτητα αλλά και την ασφάλεια του πλοίου οι συνθήκες του περιβάλλοντος.

Ο λόγος που αναζητείται περιορισμός της ταχύτητας του πλοίου κατά την πλεύση είναι ότι η σχέση ταχύτητας και κατανάλωσης καυσίμου δεν είναι γραμμική. Αυτό σημαίνει ότι μια μικρή μείωση της ταχύτητας θα επιφέρει σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, και τούμπλαλιν, μια μικρή αύξηση στην ταχύτητα του πλοίου θα επιφέρει σημαντική αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου (Daginis & Nikitakos, 2015). Η πρακτική της μείωσης της ταχύτητας του πλοίου κατά την διάρκεια του ταξιδιού ονομάζεται Slow Streaming. Το πόσο μεταβάλλεται η κατανάλωση ανάλογα την μεταβολή της ταχύτητας είναι κάτι που φυσικά διαφέρει ανάλογα το μέγεθος του πλοίου και τα στοιχεία των μηχανών, παρόλα αυτά το διάγραμμα της Εικόνας 25 δίνει

μια γενική ιδέα του μεγέθους της εξοικονόμησης καυσίμου από την πρακτική αυτή. Όπως παρατηρείται, όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο, τόσο περισσότερη είναι και η εξοικονόμηση Καυσίμου από την εφαρμογή του Slow Steaming

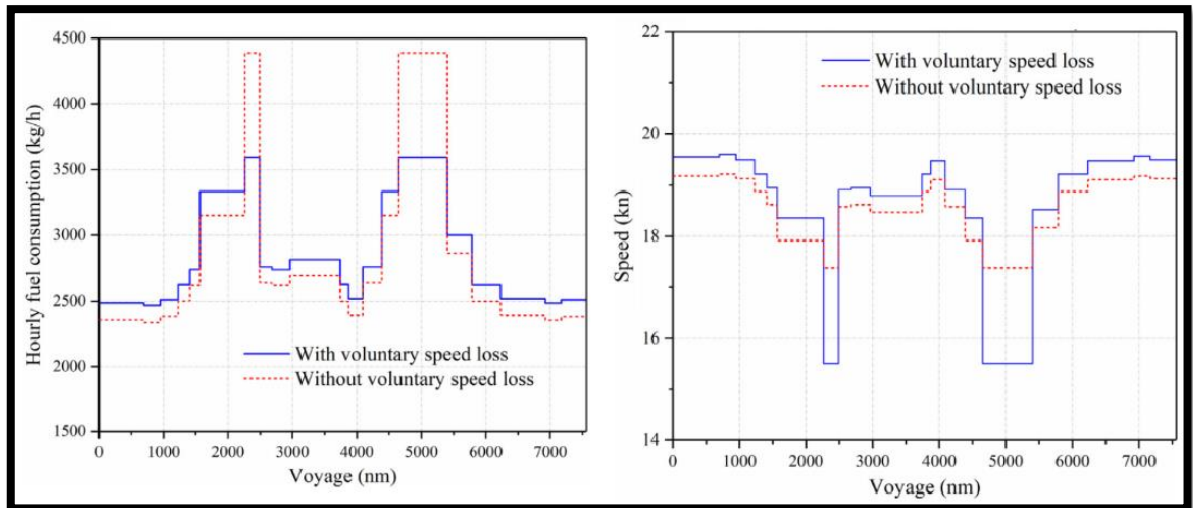


Εικόνα 25 Η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου από την εφαρμογή του Slow Steaming (Daginis & Nikitakos, 2015)

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, η εθελοντική μείωση της ταχύτητας δεν αφορά μια μοναδική τιμή σε όλο το ταξίδι, παρά μια συνεχόμενη δυναμική προσέγγιση της οικονομικότερης και ασφαλέστερης ταχύτητας ανάλογα με το που βρίσκεται το πλοίο και υπό ποιες συνθήκες.

Στην προσπάθεια τους να προσεγγίσουν το ιδανικό μοντέλο εύρεσης βέλτιστης ταχύτητας οι Li et.al (2020), κατέγραψαν ένα ρεαλιστικό σενάριο προσομοίωσης ταξιδιού ενός πλοίου, κατά το οποίο η ταχύτητα έπρεπε να αλλάξει αρκετές φορές λόγω αέρα και κυμάτων. Τα σενάρια που μπήκαν στο υπολογιστικό μοντέλο ήταν δύο, αυτό του ταξιδιού με εφαρμογή της εθελοντικής μείωσης ταχύτητας και του ταξιδιού χωρίς αυτή. Τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων σχετικά με το πόσο μειώνεται κάθε φορά η ταχύτητα και πόση είναι η διαφορά στην κατανάλωση φαίνονται στο γράφημα της Εικόνας 26. Αυτό που συμπεράναν από το μοντέλο υπολογισμού είναι ότι λόγω της εφαρμογής της μεθόδου μείωσης της ταχύτητας το ταξίδι παρατάθηκε κατά 16

ώρες η κατανάλωση καυσίμου μειώθηκε κατά 5.8%, αποδεικνύοντας τον ισχυρισμό ότι μια μικρή μεταβολή της ταχύτητας επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση.



Εικόνα 26 Παράδειγμα μείωσης της ταχύτητας κατά την διάρκεια ταξιδιού (Li et.al, 2020)

Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να ξεκαθαριστεί ότι ο περιορισμός της ταχύτητας δεν είναι ταυτόσημο της ιδανικής ταχύτητας. Δηλαδή η ιδανική ταχύτητα δεν είναι πάντα η χαμηλότερη δυνατή. Και αυτό γιατί πέρα από τους κινδύνους που υπάρχουν από την χαμηλή ταχύτητα κατά την πλεύση σε μεγάλους κυματισμούς τίθεται θέμα γενικής αποδοτικότητας από πλευράς πλευστότητας και συνολικής αντίστασης στο πλοίο. Αυτό γιατί ένα πλοίο σχεδιάζεται υπολογίζοντας ότι πλέει σε δεδομένη ταχύτητα άρα η γάστρα του, ο βολβός και γενικότερα θέματα υδροστατικής και ευστάθειας είναι προσαρμοσμένα στην ταχύτητα αυτή (Yan et.al, 2018). Η συνεχομένη και συνειδητή πλεύση με ταχύτητα αρκετά χαμηλότερη από την ταχύτητα σχεδιασμού ενδεχομένως να δημιουργήσει μη υπολογισμένες αντιστάσεις στο πλοίο.

Οι μη υπολογισμένες αυτές αντιστάσεις μπορεί εν τέλει να οδηγήσουν σε μείωση της αποδοτικότητας καυσίμου παρά σε εξοικονόμηση όπως αρχικά αναμενότανε λόγω του Slow Steaming (Du et.al, 2019). Για αυτό και το λογισμικό που συμβουλεύει σε πραγματικό χρόνο για την ιδανική ταχύτητα του πλοίου είναι ένα πολύ χρήσιμο βοήθημα.

3.4.3 Βελτιστοποίηση κατάστασης πλοίου

Πέρα από το καθαρά λειτουργικό κομμάτι της επιλογής βέλτιστης διαδρομής και του καθορισμού ιδανικής ταχύτητας μέσω τεχνολογικών βοηθημάτων, υπάρχουν και μέθοδοι που αφορούν το πλοίο καθ' αυτό που μπορούν να συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου.

Βασικό παράδειγμα είναι ο καθαρισμός της γάστρας του πλοίου (Hull cleaning) όπως επίσης και ο καθαρισμός της προπέλας του. Πρόκειται για την μέθοδο καθαρισμού της γάστρας από φυτικούς και ζωικούς μικροοργανισμούς που συγκεντρώνονται κυρίως στο κάτω μέρος του πλοίου από την συνεχόμενη επαφή με το νερό. Ο καθαρισμός αυτός μειώνει τις απώλειες που υφίσταται το σύστημα πρόωσης λόγω επικάθησης θαλάσσιων οργανισμών στα ύφαλα του πλοίου και κατ' επέκταση αυξημένης τριβής που προκαλεί μείωση στην ενεργειακή απόδοση του πλοίου. Για τους ίδιους ακριβώς λόγους και με τον ίδιο τρόπο γίνεται και ο Καθαρισμός έλικα (Propeller Polishing) του πλοίου.

Στον παρακάτω πίνα της Εικόνας 27 φαίνεται το πόσο δύναται μία εκτεταμένη μόλυνση της γάστρας την να επηρεάσει την ισχύ που απαιτείται για να διατηρηθεί η επιθυμητή ταχύτητα του πλοίου. Γίνεται αντιληπτό πως οι επιβλέψεις για την κατάσταση της γάστρας πρέπει να είναι συχνές, και δεν θα πρέπει να παραμελείται η καλή κατάσταση του κύτους καθώς ακόμα και μία ελαφριά μάζα επικαθήμενων μικροοργανισμών μπορεί να αυξήσει την απαιτούμενη ισχύ πρόωσης κατά 9% (Hou, 2017)

Hull condition	Additional shaft power to sustain speed (%)
Freshly applied coating	0
Deteriorated coating or thin slime	9
Heavy slime	19
Small calcareous fouling or macroalgae	33
Medium calcareous fouling	52
Heavy calcareous fouling	84

Εικόνα 27 Η επιπλέον ισχύς πρόωσης που απαιτείται λόγω ρύπανσης στην γάστρα (Hou, 2017)

Για να μπορεί η γάστρα να μένει καθαρή για περισσότερο καιρό, και κατά συνέπεια να διαφυλάσσεται η υψηλή απόδοση του πλοίου, προτείνεται η επικάλυψη του πλοίου με ειδικές βαφές, οι οποίες πρέπει να συμμορφώνονται με τη Διεθνή Σύμβαση για τον Έλεγχο των Επιβλαβών Αντιρρυπαντικών Συστημάτων επί των πλοίων (AntiFouling Systems Convention) η οποία περιορίζει τη χρήση βιοκτόνων σε αντιρρυπαντικές βαφές που χρησιμοποιούνται στα πλοία.

Σε κάθε περίπτωση είναι ιδιαίτερα σημαντικό να καθορίζεται ο χρόνος στον οποίον η γάστρα του πλοίου θα καθαρίζεται και κυρίως ποιος είναι ο πιο βιώσιμος από οικονομοτεχνικής άποψης τρόπος. Και αυτό διότι υπάρχει η επιλογή το πλοίο να βγει σε Dry dock προκειμένου να καθαριστεί, αλλά αυτό έχει συγκεκριμένο κόστος και φυσικά είναι αδύνατη η εξυπηρέτηση ναυλωτών όσο το πλοίο είναι στο ναυπηγείο. Για αυτό και η διαδικασία του καθαρισμού μπορεί να γίνει και υποβρυχίως χρησιμοποιώντας δύτες, χωρίς ωστόσο να υπάρχει το ίδιο αποτέλεσμα με τον καθαρισμό σε Dry dock (Bayraktar & Yuksel, 2023).

Σε κάθε περίπτωση, η ναυτιλιακή εταιρεία σε συνεργασία με τα πληρώματα πρέπει να παρακολουθεί την κατάσταση της γάστρας κάθε της πλοίου και να καταστρώνει ένα πλάνο για το πότε την συμφέρει να γίνεται ο καθαρισμός της γάστρας, λαμβάνοντας υπόψιν παράγοντες όπως η ζήτηση του κάθε πλοίου, και το είδος του νερού που πλέει (Adland et.al 2018)

Πέρα από την κατάσταση της γάστρας, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που αξίζει να εξετάζονται για την βελτιστοποίηση του πλου, παρόλο που δεν παίζουν μείζονα ρόλο στην αποδοτικότητα. Κάποια παραδείγματα είναι η βελτιστοποίηση φόρτωσης (Load optimization) και η βελτιστοποίηση της διαγωγής (Trim Optimization), παρόλα αυτά, ο καπετάνιος πέρα από εμπειρικά και γνωστικά δεδομένα δεν έχει, και δεν απαιτείται κιόλας να έχει, λογισμικά και άλλα τεχνολογικά βοηθήματα προκειμένου να αποφασίσει για αυτά.

4. Συμπεράσματα / Επίλογος

Έχοντας εξετάσει πολύπλευρα το ζήτημα της αποδοτικότητας των πλοίων, τόσο κατά τον σχεδιασμό τους όσο και κατά την λειτουργία τους, μπορούν να διατυπωθούν σαφή συμπεράσματα σχετικά με το παρόν και το μέλλον της Ναυτιλίας σχετικά με το ζήτημα αυτό.

Ο κλάδος της Ναυτιλίας στην σύγχρονη, μετά Covid, εποχή αντιμετωπίζει δύο μεγάλες προκλήσεις. Αφενός την διαρκώς αυξανόμενη, τόσο σε ποσότητα όσο και σε διασπορά, ζήτηση σε tonnage, και αφετέρου τους περιορισμούς που θέτει ο ΙΜΟ σχετικά με το πόσο ενεργειακά αποδοτικά και βιώσιμα θα είναι τα νεότευκτα αλλά και τα υπάρχοντα πλοία.

Ο στόχος είναι σαφής και πρόδηλος, αλλά δυστυχώς και εξαιρετικά αισιόδοξος, καθώς επιχειρείται έως το 2050 οι εκπομπές GHG από τις θαλάσσιες μεταφορές και δραστηριότητες να έχουν μειωθεί στο 50% σε σχέση με εκείνες του 2008. Εφόσον η ζήτηση δεν αναμένεται να μειωθεί, αντιθέτως αναμένεται να αυξηθεί, μονόδρομο αποτελεί το μονοπάτι που έχει χαράξει ο ΙΜΟ με τους κανονισμούς και τα όρια που έχει θέσει, και δεν είναι άλλο από τον περιορισμό των εκπομπών αερίων από τα πλοία μέσω της υιοθέτησης ενεργειακών μέτρων και μεθόδων που βελτιώνουν την αποδοτικότητα των πλοίων

Το αρχικό συμπέρασμα είναι ότι πρέπει να είναι σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ μεθόδων που αφορούν την αποδοτικότητα του σχεδιασμού και μεθόδων που αφορούν την αποδοτικότητα του πλου. Έτσι, στην ανασκόπηση που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν αρχικά οι σχεδιαστικοί δείκτες EEDI και EEXI που αφορούν τα νεότευκτα και τα υπάρχοντα πλοία αντίστοιχα, και αναλύθηκαν τόσο οι εξισώσεις υπολογισμού τους όσο και ο τρόπος με τον οποίον σε βάθος χρόνου τα όρια που προκύπτουν από αυτούς τους κανονισμούς γίνονται όλο και αυστηρότερα.

Έπειτα δόθηκε έμφαση στους τρόπους με τους οποίους τα πλοία θα μπορούν να συμμορφώνονται με αυτά τα όρια, με κυρίαρχη μέθοδο την σταδιακή χρήση

εναλλακτικών καυσίμων στους ναυτικούς κινητήρες. Αποδείχθηκε ότι η ευρεία χρησιμοποίησή τους έναντι των συμβατικών θα μειώσει το περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων. Παρόλα αυτά δεν υπάρχει σαφής δρόμος προς την επιλογή ενός μόνο εναλλακτικού καυσίμου, καθώς όπως είδαμε, τόσο για το LNG όσο και για διάφορα βιοκαύσιμα όπως η αμμωνία, υπάρχει ασάφεια στο κατά πόσο θα μπορέσουν να εξυπηρετήσουν μεγάλα ποσοστά της ζήτησης σε ενέργεια με βιώσιμο τρόπο, όπως επίσης και για το αν η τεχνολογία στους κινητήρες θα μπορέσει να εξελιχθεί ώστε τα εναλλακτικά αυτά καύσιμα να υπερσχύσουν έναντι των συμβατικών στο μέλλον.

Σύμφωνα με όσα εξετάστηκαν, μεγάλη έμφαση σχεδιαστικά πρέπει να δοθεί και σε ναυπηγικής φύσεως ζητήματα, καθώς με τον κατάλληλο συνδυασμό πλοίου -μηχανής- προπέλας, γίνεται εφικτή η συμμόρφωση των νέων πλοίων με το EEDI. Καθώς όμως ο αυτοσκοπός δεν είναι η μείωση του EEDI καθαυτή, αλλά η πραγματική βελτίωση της αποδοτικότητας του πλοίου, η ηλεκτροπρόωση φαίνεται να είναι και αυτή μια ισχυρή επιλογή για το μέλλον. Αυτό διότι οι προωστήριες εγκαταστάσεις στην ηλεκτροπρόωση δίνουν στο πλοίο μεγαλύτερη σχεδιαστική ευελιξία, άρα και δυνατότητα να μεταφέρουν περισσότερο φορτίο, όπως επίσης και θα οδηγήσουν αποδεδειγμένα σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου.

Όσον αφορά το λειτουργικό μέρος των πλοίων, ακολουθήθηκε η ίδια τακτική και προσέγγιση, εκκινώντας από την παρουσίαση και ανάλυση των δεικτών CII και EEOI. Κατόπιν, αναλύθηκε το πλάνο SEEMP και ο τρόπος που καταστρώνεται έτσι ώστε να θέσει σε λειτουργία όλα τα μέτρα εκείνα που δύναται να βελτιώσουν την διαχείριση της ενέργειας και τον περιορισμό εκπομπών αερίων. Αποδείχθηκε ότι με την χρήση κατάλληλων λογισμικών αλλά και εμπειρικών δεδομένων δύναται να επιλέγεται σε κάθε ταξίδι ένας ιδανικός συνδυασμός διαδρομής και ταχύτητας. Κατά αυτόν τον τρόπο κάθε ταξίδι του πλοίου γίνεται κατά το δυνατόν οικονομικότερο λαμβάνοντας πάντα υπόψιν παράγοντες όπως η ασφάλεια φορτίου και πληρώματος όπως και η επιθυμητή ώρα άφιξης στο λιμάνι προορισμού. Παράλληλα η σωστή συντήρηση και ο καθαρισμός της γάστρας εξασφαλίζει όσο το δυνατόν λιγότερες τριβές κατά την πλεύση ενώ με την χρήση

εγκεκριμένων προστατευτικών επιστρώσεων και βαφών εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη διάρκεια της καθαριότητας του κύτους αποφεύγοντας έτσι την συχνή ανάγκη δεξαμενισμού.

Σαν γενικότερο και καταληκτικό συμπέρασμα, μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει ούτε πανάκεια, ούτε μονόδρομος στις επιλογές και τις ευκαιρίες που ανοίγονται στην Ναυτιλία. Αυτό διότι μεταβάλλονται διαρκώς οι παράγοντες που επηρεάζουν την τεχνοοικονομική κατάσταση στον χώρο, όπως γενικότερα οι συνθήκες που επικρατούν στον κόσμο, εισάγοντας έτσι ασάφεια και δισταγμό από την πλευρά των επενδυτών για επενδύσεις. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι οι λύσεις στο πρόβλημα της αποδοτικότητας των πλοίων δεν μπορεί να μας παρουσιαστεί ως μια και να ισχύει για όλα τα πλοία. Κρίνεται απαραίτητο τα μέτρα περιορισμού των ρύπων και της κατανάλωσης να λαμβάνονται ξεχωριστά για κάθε πλοίο, λαμβάνοντας υπόψιν διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος και το μέγεθος του πλοίου, τα δρομολόγια που συνήθως κάνει κ.α. Το μόνο σίγουρο είναι ότι η κοινή πορεία όλων των εμπλεκόμενων κλάδων με την Ναυτιλία έχει πάρει σαφή κατεύθυνση προς την απεξάρτηση από τον άνθρακα, και έχει θέσει στόχο να μπορέσει να αναπτύξει το τεχνολογικό υπόβαθρο ώστε να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα των θαλάσσιων μεταφορών στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- Adland, R., Cariou, P., Jia, H., & Wolff, F. (2018). The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning, *Journal of Cleaner Production*, 178(1), 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.247>.
- Acomi, N., & Acomi, O. (2014). The Influence of Different Types of Marine Fuel over the Energy Efficiency Operational Index. *Energy Procedia*, 59(1), 243-248, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.373>
- Ammar, N., & Seddiek, I. (2020). Enhancing energy efficiency for new generations of containerized shipping, *Ocean Engineering*, 215, 107887, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107887>.
- Ancic, I., Theotokatos, G., & Vladimir N. (2018). Towards improving energy efficiency regulations of bulk carriers. *Ocean Engineering*, 148(1), 193-201, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.014>
- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies, *Conversion and Management*, 82(1), 72-88, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- Bayraktar, M., & Yuksel, O. (2023). Investigation of the effect of anti-fouling systems on meeting energy efficiency regulations. *Marine Science and Technology Bulletin*, 12(2), 172-182, [10.33714/masteb.1276367](https://doi.org/10.33714/masteb.1276367)
- Bouman, E., Lindstad, E., Riialand, A & Stomman, A. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review, *Transportation Research Part D*, 52(1), 408-421, <https://doi.org/10.1016/j.2017.03.022>

- Chen, J., Fei, Y., & Wan, Z. (2019). The relationship between the development of global maritime fleets and GHG emission from shipping, *Journal of Environmental Management*, 242(1), 31-39, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.136>
- ClassNK. (2021). Outlines of EEXI Regulation. *EEDI Section of Marine GHG Certification Department*, December 2021, Available online: https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/eexi/eexi_rev3e.pdf, [Accessed: 02/02/24]
- Daginis, I., & Nikitakos, N.(2015) Slow Steaming options investigation using multi criteria decision analysis method. *ECONSHIP2015* .24-27 June 2015 Chios, Greece (Conference Paper)
- Du, Y., Meng, Q., Wang, S., & Kuang, H. (2019). Two-phase optimal solutions for ship speed and trim optimization over a voyage using voyage report data, *Transportation Research Part B: Methodological*, 122(1) , 88-114, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.02.004>.
- Englert, D., Losos, A., Raucci, C. & Smith, T. (2021). The Role of LNG in the Transition Toward Low- and Zero-Carbon Shipping, World Bank, Washington, DC. <http://hdl.handle.net/10986/35437>, [Accessed: 02/02/24]
- Fang, M., & Lin, Y. (2015). The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements (II): Optimized routings. *Applied Ocean Research*. 50(1). 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.12.005>
- Hansen, E., Rasmussen, H., & Lützen, M. (2020). Making shipping more carbon-friendly? Exploring ship energy efficiency management plans in legislation and practice, *Energy Research & Social Science*, 65(1) ,101459,<https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101459>.

Hassan, S., & Karim, M. (2023). Energy-Efficient Inland Ship Design Based on Fuel Consumption and Co2 Emission Control Using Cfd, *SSRN*, Working paper, Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4384883 (Accessed 23 December 2023)

Hou, Y. (2017). Hull form uncertainty optimization design for minimum EEOI with influence of different speed perturbation types. *Ocean Engineering*. 140(1), 66-72, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.018>

Im, N., Choe, B., & Park, C. (2018). Developing and Applying a Ship Operation Energy Efficiency Evaluation Index Using SEEMP: a Case Study of South Korea. *Journal of Marine Science and Application*. 18(1), 185-194, <https://doi.org/10.1007/s11804-019-00090-w>

International Maritime Organization – IMO. (2009). Guidelines for voluntary use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI). *MEPC.1/Circ.684*, 17 August 2009.

International Maritime Organization – IMO. (2021). Fourth Greenhouse Gas Study 2020, Available at: <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx> [Accessed: 1/2/24]

International Maritime Organization – IMO. (2021). 2021 Guidelines on the method of calculation of the Attained EEXI. *MEPC 76*, Annex 7, Page 1, 17 June 2021

International Maritime Organization – IMO. (2021). 2021 Guidelines on the Shaft / Engine Power Limitation System to comply with the EEXI requirements and use of a power reserve. *MEPC 76*, Annex 9, Page 1, 17 June 2021

- International Maritime Organization – IMO. (2011). Amendments to the ANNEX of the protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating Thereto. *MEPC 62/24/Add.1, Annex 19*, page 1, Available at: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203(62).pdf), [Accessed: 01/02/24]
- Isikli, E, Aydin, N., Bigili, L, & Toprak, A. (2020). Estimating fuel consumption in maritime transport. *Journal of Cleaner Production*, Vol 275(1), 124-142, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124142>
- Joung, T., Kang, S, Lee, J., & Ahn, J. (2020). The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050, *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, Vol4(1),1-7, DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938
- Kaminski, W. (2022). Implementation of Energy Efficiency Management in Shipping Companies and Ships in operation, Scientific papers of Silesian University of technology organization and management series, 157 (1), <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2022.157.14>
- Kim, S., Roh, M., Oh, M. Park, S, & Kim, I. (2020). Estimation of ship operational efficiency from AIS data using big data technology. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 12(1), 440-454, <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2020.03.007>
- Kokkulunk, G., & Parlak, A. (2017). An Alternative Energy Efficiency Index Offer to Reduce CO2 Emissions from Ships: Fleet Energy Efficiency Management Index. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 7(1), 127-136, ISSN: 1792-9040

- Krmek, I., Biocic, T., Vujicic, S., & Hasanspahić, N. (2021, September 17-18). SWOT Analysis of Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), *Naše More 2021*, Dubrovnik, Croatia. <https://www.researchgate.net/publication/355007746>
- Kumar, D., & Zare, F. (2019). A Comprehensive Review of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality, and Regulations. *IEEE Access*, 7, 67249-67277, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2917082>
- Li, K., Liu, Y., & Sun, P. (2014). Simulation and analysis of ship energy efficiency operation index. *Advanced Materials Research*, 863(1), 680-685, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.680>
- Li, X., Sun, B., Guo, C., Du, W., & Li, Y. (2020). Speed optimization of a container ship on a given route considering voluntary speed loss and emissions. *Applied Ocean Research*, 94(1), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.101995>
- Lindstad, E., Borgen, H., Eskeland, G., Paalson, C., Psarafis, H., & Turan O. (2019), The Need to Amend IMO's EEDI to Include a Threshold for Performance in Waves (Realistic Sea Conditions) to Achieve the Desired GHG Reductions. *Sustainability*, 11(13), 36-68, <https://doi.org/10.3390/su11133668>
- Lu, R., Turan, O., Boulougouris, E., Banks, C., Incecik, A. (2015). A semi-empirical ship operational performance prediction model for voyage optimization towards energy efficient shipping, *Ocean Engineering*, 110(2), 18-28, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.042>

- Mao, X., & Meng, Z. (2022). Decarbonizing China's coastal shipping: The role of fuel efficiency and low-carbon fuels. *ICCT International Council on Clean Transportation*. Working paper. Available at: <https://theicct.org/publication/china-marine-decarbonizing-chinas-coastal-shipping-jun22/> (Accessed 23 November 2023)
- Nguyen, H., Hoang, A., Nizetic, S., Nguyen, X., Le, A., Luong, C., Chu, V., & Pham, V. (2020). The Electric Propulsion System as a green solution for Management Strategy of CO² emission in ocean shipping: A Comprehensive review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(11), <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12580>
- Nikolopoulos, N., & Boulougouris, E. (2020). A novel method for the holistic, simulation driven ship design optimization under uncertainty in the big data era. *Ocean Engineering*, 218(1), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107634>.
- Polakis, M., Zachariadis, P., & Otto de Kat, J. (2019). The Energy Efficiency Design Index (EEDI), *Sustainable Shipping*, 1, 93-135, https://doi.org/10.1007/978-3-030-04330-8_3
- Psaraftis, H., & Kontovas, C. (2013). Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26(1), 331-351, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.09.012>
- Psarafis, H., & Kontovas, C. (2020). Influence and transparency at the IMO: the name of the game. *Maritime Economics & Logistics*, 22(1), 151–172, <https://doi.org/10.1057/s41278-020-00149-4>

- Ren, H., Ding, Y., & Sui, C. (2019). Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship–Engine–Propeller Matching. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(1), 4-25, doi:10.3390/jmse7120425
- Perera, L., & Mo, B. (2016). Emission control-based energy efficiency measures in ship operations. *Applied Ocean Research*. 60(1), 29-46, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.08.006>
- Rutherford, D., Mao, X., & Comer, B. (2020). Potential CO² reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index, *ICCT International Council on Clean Transportation*. Working paper. Available at: <https://theicct.org/publication/potential-co2-reductions-under-the-energy-efficiency-existing-ship-index/>, (Accessed 1 December 2023)
- Sadr, S., & Khanzade, H. (2013). Ship Electrical Propulsion System, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3(6), 655-660, ISSN 2090-4304
- Sun, L., Wang, X., Lu, Y., & Hu, Z. (2023). Assessment of ship speed, operational carbon intensity indicator penalty and charterer profit of time charter ships. *Heliyon*, 9(10), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20719>
- Sun, L., Wang, X., Lu, Y., & Hu, Z. (2019). Dynamic Prediction and Optimization of Energy Efficiency Operational Index (EEOI) for an Operating Ship in Varying Environments, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11), <https://doi.org/10.3390/jmse7110402>
- Tokuslu, A., & Gazioglu, C. (2020). Analyzing the Energy Efficiency Design Index (EEDI) Performance of a Container Ship, *International Journal of Environmental and Geoinformatics*, 7(2), 114-119, <https://doi.org/10.30897/ijegeo.703255>.

- Tran, T. (2016) "Calculation and Assessing the EEDI Index in the Field of Ship Energy Efficiency for M/V Jules Garnier.", *Journal of Marine Science: Research & Development*, 6(6), <https://doi.org/10.4172/2155-9910.1000212>
- United Nations Conference on Trade and Development - UNCTAD. (2023). Towards a green and just transition. *Review of Maritime Transport 2023*, published 27 Sept 2023, available at: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>, [Accessed 01/02/24]
- Vladimir, N., Ancic, I., & Sestan, A. (2017). Effect of ship size on EEDI requirements for large container ships, *Journal of Marine Science and Technology*, 23(1), 42-51, <https://doi.org/10.1007/s00773-017-0453-y>
- Vicenzutti, A., Bosich, D., Giadrossi, G., & Sulligoi, G. (2015). The Role of Voltage Controls in Modern All-Electric Ships", *IEEE Electrification Magazine*, 3(1), 49-65, <https://doi.org/10.1109/MELE.2015.2413437>
- Walker, T., Adebambo, O., Del Aguila Feijoo, M., Elhaimer, E., Hossain, T., Edwards, S., Morrison, C., Romo, J., Sharma, N., Taylor, S., Zomorodi S. (2019). Environmental Effects of Marine Transportation. School for Resource and Environmental Studies, Dalhousie University, Halifax, NS, Canada
- Wang, K., Yan, X., Yuan, Y., Tang, D., & Ma, D. (2015). Design of ship energy efficiency monitoring and control system considering environmental factors. *2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. June 25 – June 28, 2015, Wuhan, P. R. China, 451-455, <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2015.7232085>
- Wang, S., Psarafis, H., & Qi, J. (2021). Paradox of international maritime organization's carbon intensity indicator, *Communications in Transportation Research*, 1(1), <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2021.100005>

- Williyan, R., Ariana, I., & Widhi, D. (2023). Evaluation of Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) on Container Ship in Indonesian Shipping, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1198(1), doi:10.1088/1755-1315/1198/1/012025
- Yan, X., Wang, K., Yuan, Y., Jiang, X., & Negenborn, R. (2018). Energy-efficient shipping: An application of big data analysis for optimizing engine speed of inland ships considering multiple environmental factors, *Ocean Engineering*, 169(1), 457-468, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.050>
- Ytreberg, A., Åstrom, S., & Fridell, E. (2021). Valuating environmental impacts from ship emissions – The marine perspective. *Journal of Environmental Management*, Vol 283, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111958>
- Zaccone, R., Ottaviani, E., Figari, M., & Altosole, M. (2018). Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation: A dynamic programming approach, *Ocean Engineering*, 153(1), 215-224, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.100>
- Zincir, B. (2023). Slow steaming application for short-sea shipping to comply with the CII Regulation. *Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development*, 74(2), <https://doi.org/10.21278/brod74202>