

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

Περιεχόμενα	1
Πρόλογος	3
Prologue	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b>	
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 IMO-περιβαλλοντική πολιτική-Κανονισμοί ρύπων-Δείκτες EEDI και EEOI	9
1.2.1 Κανονισμοί του IMO για ναυτικές μηχανές	9
1.2.2 Περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών ρύπων (ECA's)	10
1.2.3 Κανονισμοί για εκπομπές NOx	12
1.2.4 Περιεκτικότητα καυσίμων σε θείο	14
1.2.5 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου	15
1.2.6 Ιστορική αναδρομή για το δείκτη EEDI-Σύνοδοι MEPC	16
1.2.7 Ορισμός του δείκτη EEDI-Περιγραφή μεγεθών του δείκτη	22
1.2.8 Δείκτης λειτουργίας ενεργειακής απόδοσης (EEOI)	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b>	
<b>2.1 Ηλεκτροπρόωση</b>	35
2.1.1 Ορισμός	35
2.1.2 Ιστορική αναδρομή	35
2.1.3 Πού χρησιμοποιείται η ηλεκτροπρόωση	38
2.1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα	40
2.1.5 Δομή ηλεκτρικού δικτύου	42
2.1.6 Συμπεράσματα	44
<b>2.2 Ηλεκτρική πρόωση για LNG carriers</b>	44
2.2.1 Εισαγωγή	44
2.2.2 Λόγοι χρήσης της ηλεκτροπρόωσης σε πλοία μεταφοράς LNG	45
2.2.3 Κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές ρύπων-Ιδιότητες LNG	49
2.2.4 Συμπεράσματα	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup></b>	
<b>3.1 Υπολογισμός EEOI</b>	53
3.1.1 Εισαγωγή	53
3.1.2 Καταγραφή δεδομένων και υπολογισμός	54
3.1.2.1 Diesel electric propulsion LNG carrier Number 1(ΠΛΟΙΟ 1)	54
3.1.2.2 Steam propulsion LNG carrier (ΠΛΟΙΟ 2)	55
3.1.2.3 Diesel electric propulsion LNG carrier Number 2 (ΠΛΟΙΟ 3)	57
<b>3.2 Υπολογισμός EEDI</b>	60

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

3.2.1	Εισαγωγή	60	
3.2.2	Α' Τρόπος υπολογισμού EEDI	61	
3.2.2.1	Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion Number 1 (ΠΛΟΙΟ 1)	62	
3.2.2.2	Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion LNG carrier Number 2 (ΠΛΟΙΟ 3)	62	
3.2.2.3	Υπολογισμός για το Steam propulsion LNG carrier (ΠΛΟΙΟ 2)	63	
3.2.3	Β' Τρόπος υπολογισμού EEDI για ηλεκτροπρόωση	65	
3.2.3.1	Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion LNG carrier Number 1 (ΠΛΟΙΟ 1)	68	
3.2.3.2	Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion LNG carrier Number 2 (ΠΛΟΙΟ 3)	69	
3.2.4	Επέκταση δείκτη EEOI σε άλλες καταστάσεις λειτουργίας	70	
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b>			
4.1	Εισαγωγή	71	
4.2	Προσδιορισμός παραγόμενων ρύπων για τα ηλεκτροκίνητα πλοία	71	
4.2.1	Προσδιορισμός παραγόμενων ρύπων για το πλοίο 1	73	
4.2.2	Προσδιορισμός παραγόμενων ρύπων για το πλοίο 3	77	
4.3	Μετατροπή μεγεθών ρύπων για τα ηλεκτροκίνητα πλοία (ΠΛΟΙΑ 1 και 3) σε μονάδες των διεθνών κανονισμών	87	
4.3.1	Εισαγωγή	87	
4.3.2	Μεθοδολογία μετατροπής των μονάδων rpm και % Vol σε gr/kWh	88	
4.3.3	Παράθεση αποτελεσμάτων των εκπομπών CO <sub>2</sub> και NO <sub>x</sub> σε gr/kWh	93	
4.3.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων των εκπομπών CO <sub>2</sub> και NO <sub>x</sub> με τα όρια των Κανονισμών	95	
4.4	Εκπομπές ρύπων CO <sub>2</sub> και NO <sub>x</sub> για το συμβατικής πρόωσης LNG carrier (ΠΛΟΙΟ 2)	97	
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup></b>			
Ανακεφαλαίωση	συμπερασμάτων και προτάσεις περαιτέρω έρευνας	99	
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>			102
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ:</b>			
•	Λίστα σχημάτων, εικόνων και πινάκων	104	
•	Συνοτομογραφίες	106	

## **Πρόλογος**

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση και η σύγκριση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων με αδελφά πλοία συμβατικής πρόωσης. Η σύγκριση επικεντρώνεται σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG carriers).

Αρχικά, γίνεται αναφορά στο δείκτη EEDI (Energy Efficiency Design Index). Μελετάται η συνεισφορά των ηλεκτρογεννητριών στο δείκτη ως ποσοστό επί του συνόλου των εκπεμπόμενων ρύπων. Γενικά στα πλοία με συμβατική πρόωση αναμένεται αυτό το ποσοστό συνεισφοράς να είναι σχετικά μικρό αλλά όχι αμελητέο. Αντιθέτως, στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship-AES), στο οποίο επικεντρώνεται το ενδιαφέρον της εργασίας, οι ηλεκτρογεννήτριες αποτελούν τις μοναδικές θερμικές μηχανές (καθώς τροφοδοτούν με ενέργεια το σύνολο των προωστήριων μηχανισμών), επομένως η συνεισφορά τους στο δείκτη EEDI είναι καθολική. Επιπρόσθετα, αναφέρονται συνοπτικά κάποια ιστορικά στοιχεία για το δείκτη EEDI (και ειδικότερα όσον αφορά τη διαμόρφωσή του κατά τις συνόδους MEPC), καθώς και μία σύντομη περιγραφή των μεγεθών που απαρτίζουν το δείκτη.

Όπως είναι γνωστό, ο δείκτης EEDI αφορά το κάθε πλοίο στο στάδιο της σχεδίασης και κατασκευής από το εκάστοτε ναυπηγείο και επομένως η εφαρμογή του δεν μπορεί παρά να είναι απλά θεωρητική και να μην έχει κάποια πρακτική και λειτουργική σημασία. Η θεωρητική λοιπόν τιμή του δείκτη μπορεί σχετικά εύκολα να τροποποιηθεί προς συμμόρφωση με τα επιτρεπτά όρια των διεθνών κανονισμών πραγματοποιώντας θεωρητικές αλλαγές σε βασικά σχεδιαστικά και κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου όπως λόγου χάρη η ισχύς στην οποία θα λειτουργεί η μηχανή, η ταχύτητα πλεύσης κ.ο.κ. Οι τιμές αυτές μπορεί να παραμείνουν θεωρητικές και να μην ανταποκρίνονται στα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας του πλοίου καθώς αυτό θα ταξιδεύει. Επομένως, η ικανοποίηση των ορίων για το δείκτη EEDI είναι απλώς μία τυπική και θεωρητική διαδικασία και δεν έχει κάποια ιδιαίτερη πρακτική σημασία στη λειτουργία για τη μετέπειτα ζωή του πλοίου.

Για τον παραπάνω λόγο, η παρούσα διπλωματική εργασία εμβαθύνει κατά κύριο λόγο στη μελέτη του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας κατά τη λειτουργία του πλοίου δηλαδή στον EEOI (Energy Efficiency Operational Index). Ο δείκτης αυτός κρίνεται πολύ πιο χρήσιμος σε σύγκριση με τον EEDI καθώς σχετίζεται με τις

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

επιδόσεις του πλοίου (όσον αφορά τους παραγόμενους αέριους ρύπους) κατά τη λειτουργία του πλοίου και πιο συγκεκριμένα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Απεικονίζει λοιπόν την «πραγματική» ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου και όχι μία απλή θεωρητική τιμή.

Από την άλλη πλευρά, ο δείκτης ΕΕΟΙ συσχετίζει την κατανάλωση καυσίμου με το ωφέλιμο μεταφορικό έργο. Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή του περιορίζεται σε καταστάσεις πλεύσης στην ανοιχτή θάλασσα (sailing modes), όπου το πλοίο διανύει ναυτικά μίλια επομένως υφίσταται η έννοια του μεταφορικού έργου (τόννοι μεταφερόμενου φορτίου × διανυθέντα ναυτικά μίλια). Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή σε καταστάσεις εντός λιμανιού ή κοντά στο λιμάνι όπου π.χ. λαμβάνει χώρα διαχείριση φορτίου (φόρτωση-εκφόρτωση) ο δείκτης δεν μπορεί να εφαρμοστεί και κρίνεται ανεπαρκής. Αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα-πρόβλημα του δείκτη καθώς οι περιοχές γύρω από τα λιμάνια είτε ήδη αποτελούν, είτε σύντομα θα αποτελέσουν ζώνες περιορισμένων εκπομπών ρύπων (Emission Control Areas – ECA's) και συνεπώς είναι επιτακτική η ανάγκη διαμόρφωσης ενός κατάλληλου δείκτη επιδοσομέτρησης για τις καταστάσεις αυτές (cargo handling mode, manouevering mode, idle mode). Ανάμεσα στους στόχους της παρούσας εργασίας είναι και η παράθεση προτάσεων για τη διαμόρφωση ενός τέτοιου δείκτη ο οποίος δε θα περιλαμβάνει το μεταφορικό έργο και θα περιγράφει επαρκώς την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου σε αυτές τις καταστάσεις πλεύσης.

Τέλος, μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προτείνεται περαιτέρω έρευνα που αφορά εκτεταμένες συγκρίσεις των δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητας μεταξύ ηλεκτροκίνητου και συμβατικής πρόωσης πλοίου. Ο ολοένα και μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτρικών πλοίων θα συντελέσει στη δημιουργία τιμών αναφοράς και για αυτά τα πλοία. Με αυτόν τον τρόπο, η σύγκριση μεταξύ πλοίου συμβατικής και πλοίου ηλεκτρικής πρόωσης θα είναι πιο ακριβής και ολοκληρωμένη.

## **Prologue**

The aim of this thesis is to study the energy efficiency indicators on ships with electric propulsion and to compare the energy efficiency of all electric ships with the energy efficiency of similar ships with conventional propulsion. The comparison focuses on liquefied natural gas carriers (LNG carriers).

Initially, reference is made to index EEDI (Energy Efficiency Design Index) focusing on the contribution of generators in the index as a percentage of the total emissions. Generally, this percentage is expected to be quite low but not negligible for ships with a conventional propulsion system. In contrast, the fully electrified ship (All Electric Ship-AES), on which this thesis focuses, generators are the only existing heat engines (as they provide energy for the total amount of the propulsion systems), so their contribution to the index EEDI is absolute. Additionally, reference is made to some historical data for index EEDI (especially regarding its configuration during sessions MEPC), and a brief description of sizes that make up the index.

The EEDI index refers to the design and construction stage for each vessel and therefore, the application is theoretical and does not have any operational significance. The theoretical value of the index can easily be modified in order to comply with the limits of the international regulations, by performing theoretical changes in basic design and construction parameters such as nominal power, cruising speed etc. These values may remain theoretical and do not reflect the actual operating data of the vessel as it will travel. Therefore, meeting the limits for index EEDI is just one formal and theoretical process and has no particular practical importance in the operation of the ship.

For the above reason, this thesis mainly focuses on the study of the Energy Efficiency Operational Index (EEOI) . This indicator is much more useful than the EEDI, as it has to do with the performance of the ship (the generated emissions) during its operation and more specifically during the trip. In other words, EEOI depicts the "real" energy efficiency of the ship and not a mere theoretical value.

On the other hand, the index EEOI correlates fuel consumption with beneficial carryings. This means that the application is limited to situations of cruising in the open sea (sailing modes), as the ship travels some distance (nautical miles), so there is the concept of beneficial carryings (tonnes of cargo × travelled distance measured in nautical miles). Otherwise (situations of port or near port sailing, cargo handling or

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

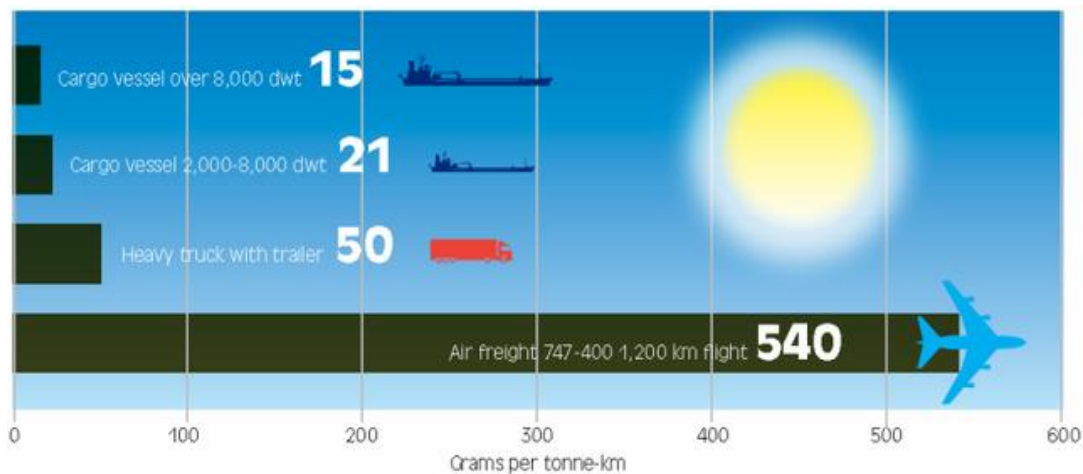
idling), the index is inadequate and cannot be applied. This is a major drawback of the index, as the areas around ports either are, or soon will become zones of limited emissions (Emission Control Areas - ECA's) and therefore there is an urgent need for an appropriate efficiency index for these situations (cargo handling mode, manoeuvring mode, idle mode). This thesis proposes the development of such an index which will not include traffic beneficial carryings and will adequately describe the energy efficiency of a ship in these situations.

Finally, this thesis suggests further research involving extensive comparisons of indicators of energy efficiency between electric and conventional propulsion ship. The growing number of electric ships will help to create reference values for the EEDI. In this way, the comparisons between steam propulsion vessels and electric propulsion vessels will be more accurate and complete.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ναυτιλία είναι το σημαντικότερο μέσο των διηπειρωτικών μεταφορών των εμπορευμάτων και αποτελεί συχνά και τη μόνη μέθοδο. Επιπλέον, η θαλάσσια μεταφορά αποτελεί το φθηνότερο μέσο από όλες τις παγκόσμιες μεταφορές και συνεπώς, περισσότερο από το 90% των κινήσεων του παγκόσμιου εμπορίου εκτελούνται μέσω πλοίων. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPPC), τα πλοία αποτελούν το μέσο με τη μικρότερη απελευθέρωση CO<sub>2</sub> ανά ποσότητα προϊόντος που μεταφέρεται. Αυτό σημαίνει ότι οι θαλάσσιες μεταφορές προσδίδουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση συγκρινόμενες με τους υπόλοιπους τρόπους μεταφοράς όπως οι αερομεταφορές και οι χερσαίες μεταφορές (σχήμα 1.1). Σήμερα, η ναυτιλία αντιπροσωπεύει μόλις το 2.7% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub>. Συνεπώς, είναι σχετικά μικρή η συνεισφορά της ναυτιλίας σε απόλυτες μονάδες στην ατμοσφαιρική ρύπανση αναλογικά με το μεταφορικό έργο που εξυπηρετεί.



**Σχήμα 1.1 :** Συνεισφορά μεταφορών στην ατμοσφαιρική ρύπανση αναλογικά με το μεταφορικό τους έργο (gr/tn-km)

Πηγή: <http://tuckcop18.wordpress.com/2012/11/30/shipping-and-climate-change/>

Οι δραματικές κλιματικές αλλαγές που βιώνει ο πλανήτης μας τα τελευταία χρόνια και οι μελλοντικές εκτιμήσεις των επιστημόνων για τη συνεισφορά των θαλασσίων μεταφορών στην κλιματική αλλαγή μέσω των εκπομπών από τα πλοία

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώωση**

οδήγησαν στην αναγκαιότητα θεσμοθέτησης των εκπομπών ρύπων των πλοίων και στη θέσπιση διεθνών κανονισμών για τα όρια των ρύπων. Η αναγκαιότητα θέσπισης των κανονισμών προέκυψε από το γεγονός ότι υπάρχει πλέον η τάση για μεταφορά όλο και μεγαλύτερου όγκου εμπορευμάτων από τις θαλάσσιες μεταφορές λόγω του χαμηλότερου σχετικά κόστους μεταφοράς. Αυτό μελλοντικά θα οδηγήσει σε δραματική αύξηση του στόλου και κατ'επέκταση στη δραματική αύξηση της απόλυτης συνεισφοράς στις ατμοσφαιρικές εκπομπές.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) είναι το κυριότερο εκ των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπουν τα πλοία. Επιπρόσθετα, τα καύσιμα των πλοίων περιέχουν μεγάλες ποσότητες θείου (3-4%) με επακόλουθο η λειτουργία των πλοίων να είναι υπεύθυνη για την εκπομπή 7.5 έως 11.5 εκατομμυρίων τόνων οξειδίων του θείου ετησίως, οι οποίες αντιπροσωπεύουν το 7% των εκπομπών θείου παγκοσμίως. Επίσης, τα πλοία εκπέμπουν περίπου 9.3 εκατομμύρια τόνους οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) ετησίως (11-12% του παγκόσμιου συνόλου από ορυκτές πηγές καυσίμων). Τέλος, άλλα αέρια που εκπέμπονται από τα πλοία, λιγότερα σημαντικά, είναι οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC), που υπολογίζονται σε 1.5 εκατομμύρια τόνους ετησίως.

Η πρώτη σημαντική δράση για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου ήταν το πρωτόκολλο του Κιότο. Το πρωτόκολλο του Κιότο είναι ένα πρωτόκολλο στο πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή, με στόχο την καταπολέμηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Το πρωτόκολλο εγκρίθηκε αρχικά στις 11 Δεκεμβρίου 1997 στο Κιότο της Ιαπωνίας, και τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου 2005. Από το Σεπτέμβριο του 2011, 191 χώρες έχουν υπογράψει και επικυρώσει το πρωτόκολλο. Το μόνο μεγάλο κράτος που έχει απομείνει να υπογράψει και δεν έχει επικυρώσει το πρωτόκολλο είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Άλλα κράτη που δεν έχουν ακόμη επικυρώσει το πρωτόκολλο είναι το Αφγανιστάν, η Ανδόρα και το Νότιο Σουδάν. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο, 37 χώρες ("χώρες του Παραρτήματος Ι") δεσμεύονται σε μία μείωση των τεσσάρων αερίων του θερμοκηπίου (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, οξείδιο του αζώτου, εξαφθοριούχο θείο) και δύο ομάδες αερίων (υδροφθοράνθρακες και υπερφθοράνθρακες) που παράγονται από αυτά, και όλες οι χώρες μέλη δίνουν γενικές δεσμεύσεις. Χώρες του Παραρτήματος Ι συμφώνησαν να μειώσουν τις συλλογικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 5.2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Το Πρωτόκολλο του Κιότο περιλαμβάνει διατάξεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

από τις διεθνείς αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές και αντιμετωπίζει αυτούς τους τομείς με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με άλλες πηγές εξαιτίας της παγκόσμιας δραστηριότητάς τους. Οι εκπομπές από τις εγχώριες αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές περιλαμβάνονται στους εθνικούς στόχους για τις χώρες του Παραρτήματος Ι.

**1.2 IMO (INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION)-  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ-ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ-ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ  
ΑΠΟΔΟΣΗΣ EEDI ΚΑΙ EEOI**

**1.2.1 Οι κανονισμοί του IMO για ναυτικές μηχανές**

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) είναι μία εξειδικευμένη υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών με ευθύνη για την ασφάλεια και την προστασία της ναυσιπλοΐας και την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία. Ιδρύθηκε επίσης με μια διεθνή διάσκεψη στη Γενεύη το 1948, και έγινε ενεργός το 1958, όταν η σύμβαση του IMO τέθηκε σε ισχύ (το αρχικό του όνομα ήταν IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultative Organization), αλλά το όνομα άλλαξε το 1982 σε IMO). Ο IMO σήμερα περιλαμβάνει 167 κράτη μέλη και 3 συνεργαζόμενα μέλη.

Οι κανονισμοί του IMO για τη ρύπανση από τα πλοία περιέχονται στη «Διεθνή Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα Πλοία», που είναι γνωστή ως MARPOL 73/78. Στις 27 Σεπτεμβρίου 1997, η Σύμβαση MARPOL τροποποιήθηκε από το "Πρωτόκολλο του 1997», το οποίο περιλαμβάνει το παράρτημα VI, με τίτλο "Κανονισμοί για την πρόληψη ρύπανσης του αέρα από πλοία". Το παράρτημα VI της MARPOL θέτει όρια για τις εκπομπές NOx και SOx και απαγορεύει τις εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος.

Τα πρότυπα εκπομπών του IMO συνήθως αναφέρονται ως Tier I, II, III πρότυπα. Τα πρότυπα Tier I ορίστηκαν στην έκδοση του 1997 του παραρτήματος VI, ενώ τα πρότυπα Tier II, III εισήχθησαν από τις τροποποιήσεις του παραρτήματος VI που υιοθετήθηκαν το 2008, ως εξής:

Πρωτόκολλο του 1997 (Tier I) - Το "Πρωτόκολλο του 1997" της MARPOL, που περιλαμβάνει το παράρτημα VI, τίθεται σε ισχύ 12 μήνες μετά την αποδοχή από 15 κράτη με όχι λιγότερο από το 50% της ολικής χωρητικότητας της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας. Στις 18 Μαΐου 2005, το κράτος των Σαμόα κατέθεσε την επικύρωσή του ως 15ο κράτος (ακολουθώντας Μπαχάμες, Μπαγκλαντές,

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Μπαρμπέντος, Δανία, Γερμανία, Ελλάδα, Λιβερία, Νησιά Μάρσαλ, Νορβηγία, Παναμά, Σιγκαπούρη, Ισπανία, Σουηδία, και Βανουάτου). Κατά την ημερομηνία αυτή, το παράρτημα VI επικυρώθηκε από τα κράτη με 54,57% της ολικής χωρητικότητας της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας. Κατά συνέπεια, το παράρτημα VI τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005. Ισχύει αναδρομικά για νέους κινητήρες άνω των 130 kW σε πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1η Ιανουαρίου 2000 και μετά, ή σε πλοία που υφίστανται ριζική μετατροπή μετά την εν λόγω ημερομηνία. Ο κανονισμός εφαρμόζεται επίσης στις σταθερές και πλωτές εξέδρες και στις εξέδρες γεώτρησης (εκτός από τις εκπομπές που συνδέονται άμεσα με την έρευνα και / ή το χειρισμό του ορυκτού πλούτου του θαλάσσιου βυθού). Εν αναμονή της επικύρωσης του παραρτήματος VI, οι περισσότεροι κατασκευαστές ναυτικών μηχανών κατασκεύαζαν κινητήρες που συμμορφώνονται με τα παραπάνω πρότυπα από το 2000.

Τροποποιήσεις 2008 (Tier II, III) – Οι τροποποιήσεις του Παραρτήματος VI που εγκρίθηκαν τον Οκτώβριο του 2008 εισήγαγαν: (1) νέες απαιτήσεις για την ποιότητα των καυσίμων από τον Ιούλιο του 2010 και μετά (Tier II και III), (2) πρότυπα εκπομπών NOx για τους νέους κινητήρες, και (3) απαιτήσεις για εκπομπές NOx για τις υφιστάμενες, προ-2000, μηχανές (Tier I). Το αναθεωρημένο παράρτημα VI τίθεται σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2010. Μέχρι τον Οκτώβριο του 2008, το παράρτημα VI, επικυρώθηκε από 53 χώρες (συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών), που αντιπροσωπεύουν το 81,88% της ολικής χωρητικότητας (τονάζ) παγκοσμίως.

### **1.2.2 Περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών ρύπων-ECA's (Emission Controlled Areas)**

Το παράρτημα 6 ορίζει δύο είδη απαιτήσεων για εκπομπές και ποιότητα καυσίμου: α) παγκόσμιες απαιτήσεις και β) πιο αυστηρές απαιτήσεις που ισχύουν για πλοία εντός των περιοχών ελεγχόμενων εκπομπών ρύπων (ECA's). Μία τέτοια περιοχή μπορεί να οριστεί για SO<sub>x</sub> ή NO<sub>x</sub> ή και για τους δύο ρύπους ταυτόχρονα.

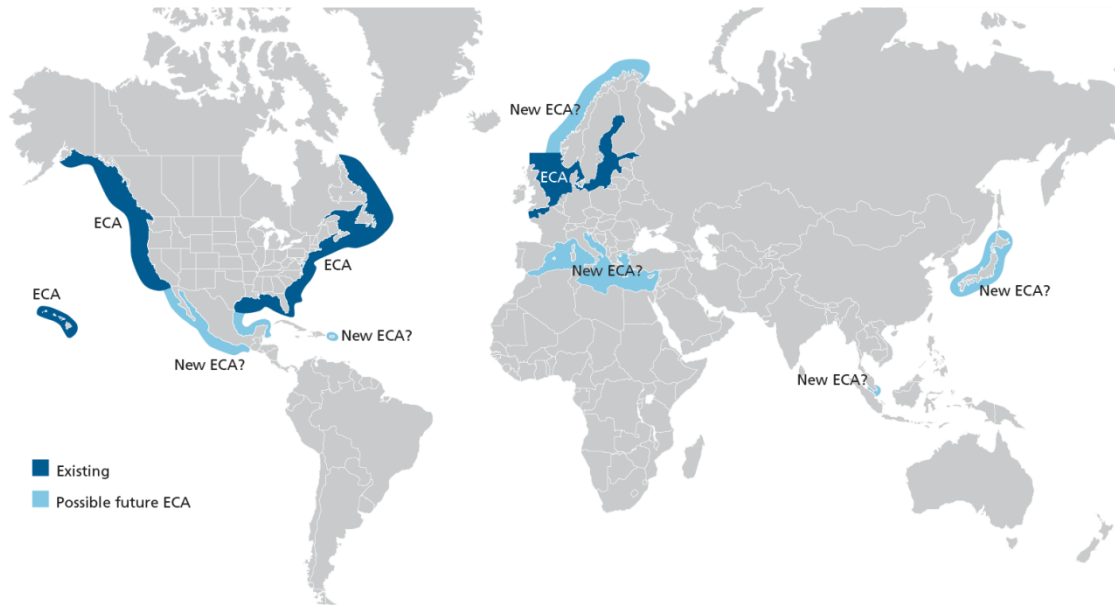
Οι υπάρχουσες περιοχές ελέγχου των εκπομπών (ECA's) περιλαμβάνουν:

- Βαλτική Θάλασσα(SO<sub>x</sub>, εγκρίθηκαν:1997 / τέθηκε σε ισχύ:2005)
- Βόρεια Θάλασσα(SO<sub>x</sub>, 2005/2006)

**Θεόδωρος Κουτσούρης**

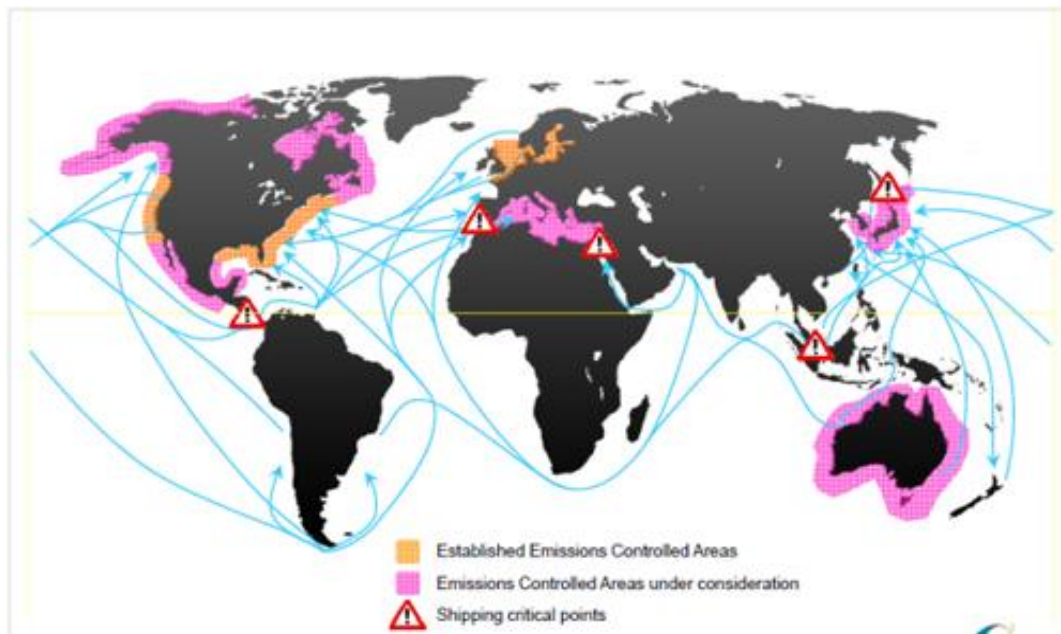
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- ECA Βορείου Αμερικής, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων από τις ΗΠΑ και την Καναδική ακτή (NOx και SOx, 2010/2012).
- Καραϊβική (USA) , συμπεριλαμβανομένων του Πουέρτο Ρίκο και των Παρθένων Νήσων (NOx και SOx, 2011/2014).



**Σχήμα 1.2 :** Χάρτης του DNV για τις περιοχές περιορισμένων εκπομπών ρύπων (ECA 's).

Πηγή: <http://dieselduck.blogspot.gr>



**Σχήμα 1.3 :** Χάρτης της Wärtsilä για τις περιοχές περιορισμένων εκπομπών ρύπων (ECA 's).

Πηγή : [www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)

### **1.2.3 Κανονισμοί για εκπομπές NOx**

Τα όρια για τις εκπομπές NOx ορίζονται για κινητήρες Diesel εξαρτώμενα από το μέγιστο αριθμό στροφών λειτουργίας του κινητήρα (Σχήμα 1.4). Οι κανονισμοί των Tier I και Tier II είναι παγκόσμιοι ενώ οι κανονισμοί του Tier III αφορούν μόνο στις περιοχές ελέγχου εκπομπών NOx.

Tier I: Για τους κινητήρες Diesel που έχουν εγκατασταθεί σε πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1η Ιανουαρίου 2000 έως την 1η Ιανουαρίου 2011, οι επιτρεπόμενες εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι:

- 17.0 g/kWh όταν οι στροφές του κινητήρα(n) είναι λιγότερες από 130 rpm.
- $45.0 * n^{-0.2}$  g/kWh όταν το n είναι μεταξύ 130 rpm και 2000 rpm.
- 9.8 g/kWh όταν η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι 2000 rpm ή περισσότερο.

Tier II: Για τους κινητήρες Diesel που έχουν εγκατασταθεί σε πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1η Ιανουαρίου 2011 και μετά, οι επιτρεπόμενες εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι:

- 14.4 g/kWh όταν οι στροφές του κινητήρα(n) είναι λιγότερες από 130 rpm.
- $44.0 * n^{-0.23}$  g/kWh όταν το n είναι μεταξύ 130 rpm και 2000 rpm.
- 7.7 g/kWh όταν το οι στροφές του κινητήρα είναι 2.000 rpm ή περισσότερο.

Tier III: Τα πλοία που κατασκευάζονται από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2016 και μετά, θα έχουν επιπλέον περιορισμούς όταν λειτουργούν σε περιοχές ελέγχου εκπομπών των ρύπων (ECA). Δεν έχουν ακόμη οριστεί περιοχές περιορισμένων εκπομπών για τις εκπομπές NOx αλλά αναμένεται ότι τόσο η Βαλτική θάλασσα όσο και η Βόρεια θάλασσα θα καθοριστούν ως περιοχές περιορισμένων εκπομπών NOx πολύ πριν από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2016. Για Tier III πλοία που δραστηριοποιούνται σε περιοχές περιορισμένων εκπομπών NOx (NOx ECA's) τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών NOx είναι:

- 3.4 g/kWh όταν οι στροφές του κινητήρα(n) είναι λιγότερες από 130 rpm.
- $9 * n^{-0.2}$  g/kWh όταν το n είναι μεταξύ 130 rpm και 2000 rpm.
- 2.0 g/kWh όταν το οι στροφές του κινητήρα είναι 2.000 rpm ή περισσότερο.

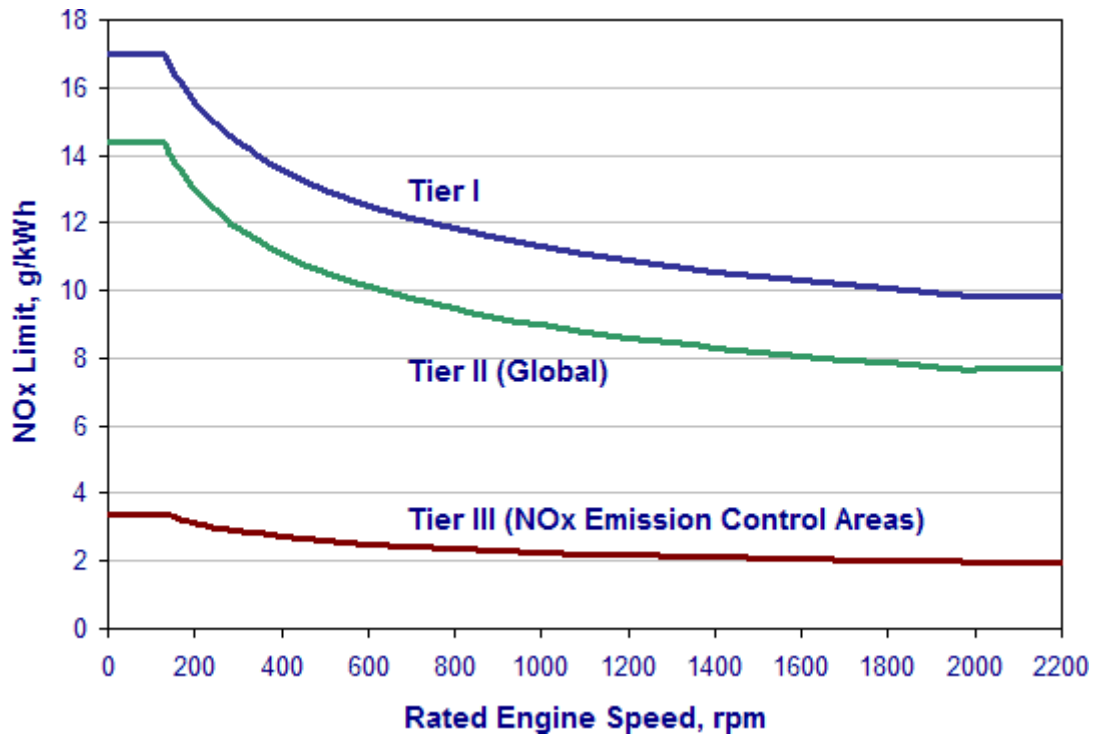
Κινητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε πλοία που κατασκευάστηκαν πριν από την 1η Ιανουαρίου 2000: Τα πλοία που κατασκευάστηκαν μετά την 1η Ιανουαρίου 1990, αλλά πριν από την 1η Ιανουαρίου 2000 θα πρέπει να συμμορφώνονται με τα

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώωση**

όρια εκπομπών NO<sub>x</sub> του Tier I. Ωστόσο, η απαίτηση έχει περιοριστεί να ισχύει για κινητήρες με παραγόμενη ισχύ άνω των 5.000 kW και εκτόπισμα ανά κύλινδρο 90 λίτρα και πάνω. Επιπλέον, η συμμόρφωση απαιτείται μόνο εάν για τη ζητούμενη μηχανή είναι διαθέσιμη μια εγκεκριμένη μέθοδος για την απόκτηση της απαιτούμενης μείωσης εκπομπών NO<sub>x</sub>. Οι κανονισμοί περιλαμβάνουν επίσης ένα μηχανισμό που θα εξασφαλίζει ότι μια εγκεκριμένη μέθοδος θα πληρεί κάποιο κριτήριο κόστους-αποτελεσματικότητας. Αυτό το κριτήριο καθορίζει ένα μέγιστο κόστος για την αγορά και την εγκατάσταση της μεθόδου. Απαραίτητες ρυθμίσεις-προσαρμογές στον κινητήρα ή τοποθετήσεις μηχανισμών περιορισμού εκπομπών NO<sub>x</sub> πρέπει να πραγματοποιηθούν το αργότερο έως την πρώτη επιθεώρηση ανανέωσης (renewal survey) που λαμβάνει χώρα 12 ή περισσότερους μήνες μετά από την έγκριση της εφαρμοζόμενης μεθόδου. Ωστόσο, αν ο προμηθευτής μιας εγκεκριμένης μεθόδου δεν είναι σε θέση να την παραδώσει κατά την επιθεώρηση ανανέωσης, η εγκατάσταση μπορεί να πραγματοποιηθεί στην επόμενη ετήσια επιθεώρηση (annual survey). Οι λεπτομερείς απαιτήσεις για την έγκριση των μεθόδων μείωσης NO<sub>x</sub> έχουν συμπεριληφθεί στον αναθεωρημένο κώδικα NO<sub>x</sub> Τεχνική. Οι λεπτομερείς απαιτήσεις για την έγκριση των μεθόδων μείωσης NO<sub>x</sub> έχουν συμπεριληφθεί στον ανανεωμένο τεχνικό κώδικα NO<sub>x</sub>.

Τα πρότυπα του Tier II αναμένεται να ικανοποιηθούν μέσω της βελτιστοποίησης της διαδικασίας καύσης. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν από τους κατασκευαστές κινητήρων περιλαμβάνουν το χρονισμό έγχυσης του καυσίμου, την πίεση, την περιοχή ροής του ακροφυσίου, το χρονισμό των βαλβίδων εξαγωγής, και τον όγκο συμπίεσης του κυλίνδρου.

Τα πρότυπα του Tier III αναμένεται να απαιτούν πολύ συγκεκριμένες τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών NO<sub>x</sub>, όπως διάφορες μορφές επαγωγής ύδατος εντός της διεργασίας καύσης (με καύσιμο, αέρα σάρωσης, ή σε-κύλινδρο), επανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR-Exhaust Gas Recirculation), ή επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR-Selective Catalytic Reduction).



Σχήμα 1.4 : Όρια εκπομπών NOx για κινητήρες Diesel.

<http://www.dieselnets.com/standards/inter/imo.php>

#### 1.2.4 Περιεκτικότητα καυσίμων σε θείο

Οι κανονισμοί του παραρτήματος VI περιλαμβάνουν αναφορές για την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο ως μέτρο για τον έλεγχο των εκπομπών SOx. Ειδικές διατάξεις για την ποιότητα των καυσίμων υπάρχουν για περιοχές ελέγχου εκπομπών SOx (SOx ECA ή SECA). Τα όρια περιεκτικότητας σε θείο και οι ημερομηνίες εφαρμογής αναφέρονται παρακάτω και απεικονίζονται στο σχήμα 1.5.

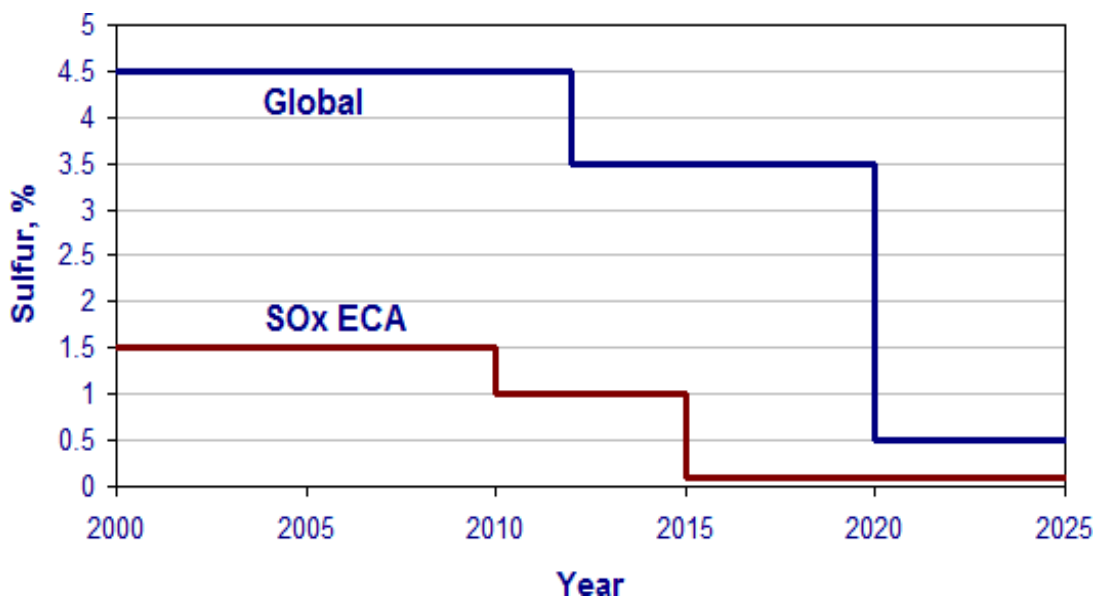
Σε παγκόσμιο επίπεδο:

- 3.5% από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2012
- 0.5% από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020

Σε SECA's:

- 1.5% από την 1<sup>η</sup> Μαρτίου 2010
- 0.1% από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2015

Θεόδωρος Κουτσούρης  
Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση



Σχήμα 1.5 : Μέγιστη περιεκτικότητα του fuel oil σε θείο και ημερομηνίες εφαρμογής.

Πηγή: <http://www.dieselnets.com/standards/inter/imo.php>

Βαρύ πετρέλαιο (HFO) επιτρέπεται όταν πληρεί την ισχύουσα περιεκτικότητα σε θείο (δηλαδή δεν είναι υποχρεωτικό να χρησιμοποιούνται απεσταγμένα καύσιμα). Εναλλακτικά μέτρα επίσης επιτρέπονται (τόσο στις περιοχές περιορισμού εκπομπών SOx όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο) για τη μείωση των εκπομπών θείου όπως η χρήση διατάξεων έκπλυσης (scrubbers). Για παράδειγμα, αντί να χρησιμοποιούν καύσιμο περιεκτικότητας 1.5% σε θείο στις περιοχές SECA's, τα πλοία μπορούν να χρησιμοποιούν ένα σύστημα καθαρισμού των καυσαερίων ή οποιαδήποτε άλλη τεχνολογικά μέθοδο ώστε να περιορίζουν τις εκπομπές SOx σε ποσό μικρότερο από 6 gr/kWh (ως SO<sub>2</sub>).

Για να επιβεβαιωθεί ότι η βιομηχανία δύλισης μπορεί να ανταποκριθεί στη ζήτηση για καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο μέχρι το 2020, έχει εισαχθεί μια ρήτρα επανεξέτασης προγραμματίζοντας μια ανασκόπηση της διαθεσιμότητας των καυσίμων που πρόκειται να ολοκληρωθεί μέχρι το 2018. Αν αυτή η κριτική επανεξέταση αποκαλύψει ότι είναι αδύνατον να ικανοποιηθεί το όριο του 0.50% μέχρι το 2020, η απαίτηση θα αναβληθεί μέχρι την 1η Ιανουαρίου 2025.

### **1.2.5 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG-Greenhouse Gas)**

Υποχρεωτικά μέτρα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τη διεθνή ναυτιλία εγκρίθηκαν από κάποιες ομάδες στο παράρτημα VI της MARPOL στην Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), όταν συναντήθηκαν για την 62η σύνοδό της από τις 11 έως 15 Ιουλίου 2011 στην έδρα του IMO στο Λονδίνο. Εκεί θεσπίστηκε το πρώτο παγκοσμίως καθεστώς για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη παγκόσμια βημοχανία. Το 2011 Τροποποιήσεις στο παράρτημα VI της MARPOL προσέθεσαν ένα νέο τέταρτο κεφάλαιο στο παράρτημα VI με θέμα «Κανονισμοί για την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων».

Το κεφάλαιο 4 του παραρτήματος 6 της MARPOL εισάγει δύο υποχρεωτικούς μηχανισμούς που στόχο έχουν την διασφάλιση ενός ορίου ενεργειακής αποδοτικότητας για τα πλοία: α)το δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης **EEDI** (Energy Efficiency Design Index) και β)το σχέδιο διαχείρισης της ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου **SEEMP** (Ship Energy Efficiency Management Plan) για όλα τα πλοία.

Το EEDI είναι ένας μηχανισμός που απαιτεί μία συγκεκριμένη ελάχιστη ενεργειακή αποδοτικότητα για τα νέα πλοία. Σχεδιαστές και κατασκευαστές πλοίων είναι ελεύθεροι να επιλέξουν τις τεχνολογίες και τους τρόπους που θα χρησιμοποιήσουν έτσι ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του EEDI για το εκάστοτε πλοίο.

Το SEEMP καθιερώνει έναν μηχανισμό για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων.

Οι κανονισμοί ισχύουν για όλα τα πλοία με ολική χωρητικότητα (gross tonnage) πάνω από 400 κόρρους και τέθηκαν σε ισχύ από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2013. Σε μία αρχική περίοδο 6.5 ετών από την ημερομηνία έναρξης ισχύος υπάρχει μία σχετική ευελιξία, καθώς δίνεται η δυνατότητα στον IMO να παραιτηθεί από την απαίτηση συμμόρφωσης με το EEDI ορισμένων νέων πλοίων, όπως αυτά που είναι ήδη υπό κατασκευή.

#### **1.2.6 Ιστορική αναδρομή για το δείκτη EEDI – Σύνοδοι MEPC**

Ο Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index η EEDI) είναι ένα μέτρο της αποδοτικότητας της σχεδίασης ενός νέου πλοίου σε σχέση με τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Μετράται σε ποσότητα (γραμμάρια) που εκπέμπεται στο περιβάλλον ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου (tonne) και μονάδα απόστασης (nautical mile) που μεταφέρεται το φορτίο. Εκφράζει δηλαδή κατά κάποιο τρόπο το περιβαλλοντολογικό κόστος σε σχέση με το όφελος για την κοινωνία.



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Ο δείκτης EEDI έχει αναπτυχθεί από τον IMO κατά τη διάρκεια των τελευταίων 4- 5 ετών μέσω μιας σειράς MEPC ως εξής .

**MEPC 57 – Απρίλιος 2008**

Στη σύνοδο αυτή ο EEDI παρουσιάστηκε αρχικά ως «δείκτης εκπομπών του CO<sub>2</sub>» από την Ιαπωνία. Η τιμή του είχε μονάδες γραμμαρια του CO<sub>2</sub> ανά μεταφορική εργασία (γραμμάρια / τόνο-μίλι). Η βασική ιδέα ήταν ο δείκτης να επιτρέψει μια προκαταρκτική αξιολόγηση της απόδοσης σκαφών στο στάδιο σχεδιασμού ακόμα με την διαδικασία υπολογισμού να είναι απλή και ικανή για ευρεία εφαρμογή και αντανάκλυνε τις προσπάθειες από όλους τους συμμετόχους να μειωθούν οι εκπομπές του CO<sub>2</sub> με την απεικόνιση της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός σκάφους σε πραγματική χρήση. Ιαπωνία και Δανία ανέλαβαν να παρουσιάσουν τους δείκτες εκπομπών του CO<sub>2</sub> στη 1η συνεδρίαση της Ομάδας Εργασίας σχετικά με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τα σκάφη. Η βασική μορφή της εξίσωσης που προέκυψε είχε την απλουστευμένη μορφή:

$$EEDI = \frac{P \cdot C_F \cdot SFC}{Capacity \cdot V_{ref}} \quad (1.1)$$

Η Δανία επεκτάθηκε επάνω στις ιδέες της Ιαπωνίας και χώρισε τις εκπομπές σε εκείνες που προέρχονται από την προωστήρια εγκατάσταση και εκείνες που παρήχθησαν από τις ηλεκτρογεννήτριες. Αυτή η εξίσωση παρουσιάστηκε ως εξής :

$$EEDI = \frac{1}{Capacity \cdot V_{ref}} \left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} + \left( \prod_{k=1}^M f_k \right) \sum_{i=1}^{nAE} P_{AEeff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right\} \quad (1.2)$$

**MEPC 58 – Οκτώβριος 2008**

Στη σύνοδο αυτή ο EEDI εμπλουτίστηκε αρχικά με ένα νέο παράγοντα για τις καιρικές συνθήκες, fw, όπως προβλέπεται και στην υποβολή της Ιαπωνίας :

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

$$EEDI = \frac{1}{Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} + \left( \prod_{k=1}^M f_k \right) \sum_{i=1}^{nAE} P_{AEeff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right\} \quad (1.3)$$

Οι συζητήσεις και υποβολές στην σύνοδο αυτή καθόρισαν καλύτερα κάθε μια από τις μεταβλητές και την προσαρμογή τους στους διαφορετικούς τύπους σκαφών.

Ένας πρόσθετος παράγοντας που αντιπροσωπεύει τις "καινοτόμες τεχνολογίες όσον αφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας" εισήχθη από τις Ηνωμένες Πολιτείες στη ίδια σύνοδο με αποτέλεσμα η προκύπτουσα εξίσωση να είναι η ακόλουθη:

$$EEDI = \frac{1}{Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \left\{ \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + \left( \sum_{i=1}^{nAE} P_{AE(i)} \cdot C_{FAE(i)} \cdot SFC_{AE(i)} \right) - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{F_{eff}} \cdot SFC_{eff} \right) \right\} \quad (1.4)$$

Με το πέρας της MEPC 58, ο δείκτης εκπομπής CO<sub>2</sub> ονομάστηκε πλέον δείκτης EEDI (Energy Efficiency Design Index) .

Προστέθηκαν ένας άλλος όρος ακόμα στον αριθμητή για να εκπροσωπήσει τις μηχανές και τις μειώσεις σε κατανάλωση λόγω των τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια και ένας παράγοντας στον παρονομαστή για να αποτελέσει τα τεχνικά ή ρυθμιστικά όρια στην χωρητικότητα . Η αναθεωρημένη εξίσωση έγινε:

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

$$EEDI = \frac{1}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) \right. \\ \left. + \left[ \left( \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right] \right. \\ \left. - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right) \right\} \quad (1.5)$$

**MEPC 59 – Ιούλιος 2009**

Στη σύνοδο αυτή ο EEDI έλαβε την σημερινή του μορφή:

$$EEDI = \frac{1}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) \right. \\ \left. + \left[ \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right] \right. \\ \left. - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right) \right\} \quad (1.6)$$

και από τα κράτη-μέλη ζητήθηκε να γίνει προαιρετική εφαρμογή του δείκτη έτσι ώστε αυτός να δοκιμασθεί στην πράξη και να αποκτηθεί σχετική εμπειρία. Στην ίδια Σύνοδο αναπτύχθηκε προσωρινή οδηγία (MEPC 1/Circ. 681, "Interim Guidelines on the Method of Calculation of the Energy Efficiency Design Index for New Ships.") με λεπτομέρειες για τον τρόπο υπολογισμού του EEDI για νέα πλοία, καθώς και προσωρινή οδηγία (MEPC 1/Circ. 682, "Interim Guidelines for voluntary verification of the Energy Efficiency Design Index for New Ships.") με λεπτομέρειες για τον τρόπο ελέγχου και επαλήθευσης του υπολογισμού του EEDI από ανεξάρτητους Οργανισμούς.

**MEPC 60 – Μάρτιος 2010**

Στη σύνοδο αυτή συζητήθηκε διεξοδικά η υποχρεωτική εφαρμογή του EEDI καθώς και οι συνέπειες που θα είχε μία πιθανή τέτοια απόφαση. Ο υπολογισμός της βασικής γραμμής αναφοράς του EEDI (reference line) για τον υπάρχοντα στόλο

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώση**

συζητήθηκε επίσης χωρίς να καταστεί δυνατή μία τελική συμφωνία και για αυτό το θέμα.

**MEPC 61 – Οκτώβριος 2010**

Στη σύνοδο αυτή παρουσιάστηκε και συζητήθηκε ένα αρχικό κείμενο κανονισμών για την υποχρεωτική εφαρμογή του EEDI χωρίς να καταστεί δυνατή η συμφωνία για ένα χρονοδιάγραμμα εφαρμογής. Στους παραπάνω αναφερόμενους κανονισμούς περιλαμβάνονται οι ορισμοί του επιτυγχανόμενου και απαιτούμενου EEDI για κάθε πλοίο. Ο απαιτούμενος ορίζεται να είναι αυτός που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς (reference line) για την φάση 0 (έως 31.12.2014), μειωμένος κατά 10% σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς για την φάση 1 (από 01.01.2015 έως 31.12.2019), μειωμένος κατά 20% σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς για την φάση 2 (από 01.01.2020 έως 31.12.2024) και μειωμένος κατά 30% σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στη βασική γραμμή αναφοράς για την φάση 3 (από 01.01.2025 και μετά).

Επτά συνολικά τύποι πλοίων περιλαμβάνονται στο πρώτο αυτό σχέδιο κανονισμών bulk carriers, tankers, gas tankers, container ships, general cargo vessels, refrigerated cargo vessels και combination carriers.

**MEPC 62 – Ιούλιος 2011**

Η σύνοδος αποφάσισε την τροποποίηση του παραρτήματος 6 της MARPOL καθιστώντας το δείκτη EEDI υποχρεωτικό. Η ημερομηνία έναρξης της ισχύος της σχετικής απαίτησης του EEDI καθορίστηκε η 1-1-2013, ενώ οι τύποι των πλοίων, τα ποσοστά μείωσης κ.λ.π. παρέμειναν τα ίδια όπως είχαν συμφωνηθεί στην προηγούμενη MEPC.

**MEPC 63 – Μάρτιος 2012**

Η σύνοδος επικύρωσε οδηγίες υπολογισμού και εξακρίβωσης του EEDI. Οι οδηγίες αυτές αποτελούν την ουσία του κανονισμού καθώς καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο θα υπολογίζεται το νούμερο EEDI για κάθε νέο πλοίο. Το EEDI θα εφαρμοστεί στα πλοία συμβολαίου κατασκευής από 1-1-2013.

## **MEPC 64 – Οκτώβριος 2012**

Κύριο αντικείμενο της συνόδου σε ότι αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα ήταν η θέσπιση ενός κατώτερου ορίου ασφαλείας έτσι ώστε να ικανοποιείται ο κανονισμός για την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, ενώ παράλληλα να εξασφαλίζεται η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας. Η Ελλάδα προέτρεπε τον IMO να θέσει ένα ελάχιστο όριο ασφαλείας, κάτω του οποίου να μην επιτρέπεται η κατασκευή τέτοιων πλοίων. Η Ελλάδα επέμενε ότι το όριο αυτό θα έπρεπε να καθοριστεί στην ταχύτητα σχεδιασμού του πλοίου και όχι στην ιπποδύναμη της μηχανής. Λόγω εμπειρίας, γνωρίζουμε ότι η ελάχιστη ταχύτητα εξασφαλίζει κάποιο ασφαλές αποτέλεσμα. Πλοία με ταχύτητες σχεδιασμού 14 knots και πάνω δεν έχουν πρόβλημα σε άσχημο καιρό άρα μπορεί π.χ. να εφαρμοστεί ένα κατώτατο όριο ταχύτητας στους 13.5 knots. Στην πρόταση αυτή της Ελλάδας αντιτάχθηκαν σφόδρα οι ναυπηγικές χώρες προτείνοντας ότι η ελάχιστη ιπποδύναμη είναι το πιο σωστό μέτρο. Με τον τρόπο αυτό τα ναυπηγεία θα μπορούν πολύ απλά να μειώνουν την εγκατεστημένη ιπποδύναμη εγκαθιστώντας μικρότερες μηχανές αποφεύγοντας έτσι αλλαγές στα σχέδια των γαστρών προς όφελος της αντίστασης της γάστρας. Το ερώτημα όμως που ανέκυψε είναι τελικά πόσο μπορεί να μειωθεί η ιπποδύναμη ενός πλοίου, προτού αυτό έχει πρόβλημα ναυσιπλοΐας σε άσχημο καιρό. Το ερώτημα αυτό χρήζει προφανώς μελέτης και εξαρτάται προφανώς από το πόσο καλοσχεδιασμένο είναι το πλοίο. Τελικά, ο IACS είχε ήδη αναλάβει τη μελέτη με βάση την ελάχιστη ιπποδύναμη και κατά τη σύνοδο παραδέχτηκε ότι ακόμα η μελέτη είναι σε πολύ πρώιμο στάδιο. Ωστόσο, επειδή τον Ιανουάριο του 2013 θα ξεκινούσε η εφαρμογή του κανονισμού EEDI έπρεπε να καθοριστεί κάποιο όριο ασφαλείας. Η επιτροπή αποφάσισε τελικά ότι το αρχικό όριο ασφαλείας θα είναι εντελώς στατιστικό δηλαδή ως όριο θα τεθεί η μικρότερη ιπποδύναμη με την οποία έχει κατασκευαστεί οποιοδήποτε πλοίο της τελευταίας δεκαετίας, απόφαση αντίθετη με τις θέσεις της Ελλάδας.

**1.2.7 Ορισμός του Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI),  
 Επεξήγηση –Περιγραφή των όρων του δείκτη**

Ο υπολογισμός του Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) του πλοίου βασίζεται στα δεδομένα σχεδιασμού του πλοίου και αντιπροσωπεύει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> του συγκεκριμένου πλοίου σε ένα μόνο σημείο του σχεδιασμού και όχι για την πλήρη λειτουργία του και άλλες καταστάσεις φόρτωσης. Οι μονάδες στις οποίες ο EEDI εκφράζεται είναι γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά τόνο και ανά ναυτικό μίλι (gCO<sub>2</sub> / t · nm).

Η Επιτροπή του IMO έχει ορίσει δύο EEDI δείκτες για κάθε πλοίο. Και οι δύο βασίζονται στην ίδια υπολογιστική φόρμουλα ελαφρώς τροποποιημένη για κάθε δείκτη. Οι δύο δείκτες είναι ο δείκτης σχεδιασμού επιτυγχανόμενης / δυνατής ενεργειακής απόδοσης (EEDI<sub>A</sub>) και ο δείκτης σχεδιασμού απαιτούμενης ενεργειακής απόδοσης (EEDI<sub>BL</sub>).

**A) Δείκτης σχεδιασμού επιτυγχανόμενης / δυνατής ενεργειακής απόδοσης (EEDI<sub>A</sub>)**

Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται από συγκεκριμένο τύπο ο οποίος δίνεται από τον IMO και περιλαμβάνει τα ακόλουθα μεγέθη :

$$EEDI = \frac{1}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) \right. \\ \left. + \left[ \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right] \right. \\ \left. - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right) \right\} \quad (1.6)$$

***P (Κύρια ισχύς πρόωσης ή βοηθητική ισχύς)***

P είναι η ισχύς των κύριων ή βοηθητικών μηχανών, μετρούμενη σε κιλοβάτ (kW). Οι δείκτες ME<sup>1</sup> και AE<sup>2</sup> αφορούν τις κύριες και βοηθητικές μηχανές, αντίστοιχα. Το άθροισμα (i) είναι για όλες τις κύριες μηχανές (από 1 έως n<sub>ME</sub>).

*1 ME: Main Engine*

*2 AE: Auxilliary Engine*

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**$P_{ME}(i)$ : (ισχύς της κύριας μηχανής  $i$ )**

$P_{ME}(i)$  ορίζεται ως το 75% της εγκατεστημένης ονομαστικής Ισχύος (MCR) για κάθε κύρια μηχανή ( $i$ ) αφού αφαιρεθούν τυχόν ροές ισχύος σε εγκατεστημένες γεννήτριες άξονα.

Η ισχύς της κύριας μηχανής που αφορά το κομμάτι της πρόωσης δίνεται από τον τύπο:

$$\boxed{P_{ME}(i) = 0.75 * (MCR_{ME}(i) - P_{PTO}(i))} \quad (1.7)$$

Όπου :

$MCR_{ME}(i)$  είναι η μέγιστη συνεχής ισχύς της μηχανής  $i$

Και

$P_{PTO}(i)$  είναι το 75% της εγκατεστημένης ισχύος της κάθε γεννήτριας άξονα διαιρεμένο με το βαθμό απόδοσης της εκάστοτε γεννήτριας άξονα.

**$P_{AE}$  (ισχύς των βοηθητικών μηχανών)**

$P_{AE}$  είναι η απαιτούμενη ισχύς των βοηθητικών μηχανών συμπεριλαμβανομένης της απαραίτητης ισχύος για τα μηχανολογικά συστήματα πρόωσης και για την ενδιάπιση στην κατάσταση φόρτωσης σχεδιασμού σε ταχύτητα  $V_{ref}$ . Η δύναμη που δεν είναι για την πρόωση αποκλείεται (π.χ. προωθητές, αντλίες φορτίου, φορτοεκφορτωτικά, αντλίες έρματος). Ο πιο ακριβής τρόπος για να εκτιμηθεί το  $P_{AE}$  είναι μέσω της ανάλυσης του ηλεκτρικού ισολογισμού του πλοίου. Ωστόσο, εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τον υπολογισμό των  $P_{AE}$ , ο IMO προτείνει δύο τύπους για τον υπολογισμό του  $P_{AE}$  σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ της κύριας μηχανής του πλοίου. Οι δύο εμπειρικοί τύποι είναι οι ακόλουθοι :

$(0,025 X MCR) + 250$  , όταν το  $MCR$  είναι μεγαλύτερο η ίσο με  $10000 kW$  και  
 $0,05 MCR$ , όταν το  $MCR$  είναι μικρότερο από  $10000 kW$ ,  
εκτός και εάν οι παραπάνω τιμές απέχουν πολύ από τις πραγματικά απαιτούμενες πάνω στο πλοίο.

**$P_{PTI(i)}$  (Power-Take-In για την κύρια πρόωση)**

$P_{PTI(i)}$  (Power-Take-In) είναι η ισχύς που παρέχεται στον άξονα κίνησης από έναν βοηθητικό κινητήρα (π.χ. γεννήτρια άξονα που λειτουργεί αντίστροφα ως μια

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

προωθητική μηχανή). Η τιμή του  $P_{PT(i)}$  θεωρείται ότι είναι το 75% της ονομαστικής ισχύος κάθε κινητήρα διαιρεμένο με το βαθμό απόδοσης της γεννήτριας.

**$P_{eff(i)}$**

$P_{eff(i)}$  είναι το 75% της μείωσης ισχύος της κύριας μηχανής (kW) λόγω της καινοτόμου ενεργειακά αποδοτικής μηχανολογικής τεχνολογίας.

**$P_{AEff(i)}$**

$P_{AEff(i)}$  είναι η μείωση της βοηθητικής ισχύος (kW), λόγω της καινοτόμου ενεργειακά αποδοτικής ηλεκτρικής τεχνολογίας που μετράται σε  $P_{ME(i)}$ .

**$C_F$  (συντελεστής εκπομπής  $CO_2$ )**

$C_F$  είναι ο συντελεστής μετατροπής μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και εκπεμπόμενων  $CO_2$  με βάση την περιεκτικότητα σε άνθρακα του συγκεκριμένου τύπου καυσίμου. Και οι δύο μετρώνται στην ίδια μονάδα μάζας (π.χ. γραμμάρια). Οι δείκτες M.E.(i) και A.E.(i) αναφέρονται στις κύριες και βοηθητικές μηχανές, αντίστοιχα. Εκφράζουν δηλαδή την ισοδύναμη εκπομπή του  $CO_2$  από την καύση μιας δεδομένης μάζας των καυσίμων. Εξαρτώνται από την περιεκτικότητα των καυσίμων σε άνθρακα και οι τιμές τους για τα βασικά καύσιμα της Ναυτιλίας έχουν υπολογισθεί (με την υπόθεση της τέλει καύσης) ως εξής :

**Πίνακας 1.1:** Συντελεστής εκπομπής  $CO_2$  για κάθε τύπο καυσίμου

Καύσιμο	Προδιαγραφή καυσίμου	Περιεχόμενο σε C	$C_F$ (τόννοι $CO_2$ / τόννοι καυσίμου)
Diesel / Gas oil	ISO 8217 Grades DMX - DMC	0,875	3,20600
Light Fuel oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA - RMD	0,860	3,15104
Heavy Fuel oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME - RMK	0,850	3,11440



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG)	Προπάνιο/Βουτάνιο	0,819/0,817	3,00000 3,03000
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)		0,75	2,75000

Στον υπολογισμό του EEDI χρησιμοποιούνται οι τιμές εκείνες που αντιστοιχούν στο καύσιμο που έχει χρησιμοποιηθεί στις δοκιμές για την έκδοση του πιστοποιητικού EIAPP (Engine International Air Pollution Prevention) κύριων και βοηθητικών μηχανών.

***SFC (ειδική κατανάλωση καυσίμου)***

SFC είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα (και χάριν συντομίας ως SFOC-specific fuel oil consumption), μετρημένη σε gr/kWh. Οι δείκτες M.E. (i) και A.E. (i) αναφέρονται στις κύριες και βοηθητικές μηχανές, αντίστοιχα. Η τιμή του SFC που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $EEDI_{\Lambda}$  θα πρέπει να είναι η τιμή που καταγράφεται στο πιστοποιητικό EIAPP (Engine International Air Pollution Prevention-EIAPP-Certificate) στο 75% ή στο 50% του MCR ή της ροπής της κύριας μηχανής, αναλόγως την εκάστοτε πιστοποίηση. Για τους κινητήρες που δε διαθέτουν έκθεση δοκιμών μέσα στο τεχνικό αρχείο NO<sub>x</sub>, επειδή η ισχύς τους είναι χαμηλότερη από 130 kW, χρησιμοποιείται η ειδική κατανάλωση που δίδεται απ'τον κατασκευαστή και η οποία έχει εγκριθεί από την αρμόδια αρχή. Στο στάδιο του σχεδιασμού, σε περίπτωση έλλειψης της έκθεσης δοκιμών από το αρχείο NO<sub>x</sub>, χρησιμοποιείται η ειδική κατανάλωση που δίδεται απ'τον κατασκευαστή και έχει εγκριθεί από την αρμόδια αρχή. Για μηχανές που λειτουργούν με καύσιμο LNG, των οποίων δίνεται η ειδική κατανάλωση ενέργειας σε kJ/kWh, υπολογίζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε gr/kWh, χρησιμοποιώντας τη θερμογόνο δύναμη του υγροποιημένου φυσικού αερίου (48000 kJ/kg).

***Χωρητικότητα-Μεταφορική ικανότητα (Capacity)***

Η Μεταφορική ικανότητα ορίζεται ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Για πλοία ξηρού φορτίου, δεξαμενόπλοια, γκαζάδικα, Ro-Ro και πλοία γενικού φορτίου, το νεκρό βάρος (DWT) χρησιμοποιείται ως "χωρητικότητα".

Για τα επιβατηγά και Ro-Ro / επιβατηγά πλοία, η ολική χωρητικότητα (GRT), θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως «μεταφορική ικανότητα».

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Για Containerships η παράμετρος μεταφορική ικανότητα θα πρέπει να καθοριστεί στο 70% του νεκρού βάρους (DWT).

**$V_{ref}$  (ταχύτητα αναφοράς)**

$V_{ref}$  είναι η ταχύτητα του πλοίου μετρημένη σε ναυτικά μίλια ανά ώρα (κόμβοι) στο μέγιστο φορτίο σχεδιασμού σε βαθιά νερά και αν υποτεθεί ότι ο καιρός είναι ήρεμος χωρίς ανέμους και χωρίς κύματα.

**Αδιάστατοι Παράγοντες του τύπου για τον υπολογισμό του EEDI**

Οι υπόλοιποι παράγοντες της μεθόδου υπολογισμού είναι:

$f_i$  = αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης για λογαριασμό πλοίου ειδικού σχεδιασμού.

1. Ο συντελεστής διόρθωσης της ισχύος,  $f_j$ , σε πλοία κλάσης πάγου θα πρέπει να λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη τιμή μεταξύ των  $f_{j0}$  και  $f_{j,min}$ , όπως παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, αλλά όχι μεγαλύτερος από το  $f_{j,max} = 1$ .

**Πίνακας 1.2:**  $f_{j0}$  και  $f_{j,min}$  για πλοία ειδικού σχεδιασμού

Ship type	$f_{j0}$	$f_{j,min}$			
		IA Super	IA	IB	IC
Tanker	$(0.308 * L_{PP}^{1.920}) / (\sum_i P_{ME(i)})$	$0.15 * L_{PP}^{0.30}$	$0.27 * L_{PP}^{0.21}$	$0.45 * L_{PP}^{0.13}$	$0.70 * L_{PP}^{0.06}$
Bulk carrier	$(0.639 * L_{PP}^{1.754}) / (\sum_i P_{ME(i)})$	$0.47 * L_{PP}^{0.09}$	$0.58 * L_{PP}^{0.07}$	$0.73 * L_{PP}^{0.04}$	$0.87 * L_{PP}^{0.02}$
General Cargo ship	$(0.0227 * L_{PP}^{2.483}) / (\sum_i P_{ME(i)})$	$0.31 * L_{PP}^{0.16}$	$0.43 * L_{PP}^{0.12}$	$0.56 * L_{PP}^{0.09}$	$0.67 * L_{PP}^{0.07}$

2. Ο παράγοντας  $f_j$  για δεξαμενόπλοια μεταφοράς (shuttle tankers) περίσσειας ισχύος μεταξύ 80000 και 160000 τόννων DWT λαμβάνεται ίσος με 0.77. Τέτοιου είδους δεξαμενόπλοια χρησιμοποιούνται για τη φόρτωση του αργού πετρελαίου από υπεράκτιες (offshore) εγκαταστάσεις. Είναι εξοπλισμένα με διπλό κινητήρα και δύο έλικες έτσι ώστε να υπάρχει η απαραίτητη, σύμφωνα με την κλάση, εφεδρεία ισχύος.
3. Για τα υπόλοιπα είδη πλοίων το  $f_j$  λαμβάνεται ίσο με τη μονάδα.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

$f_w$  = αδιάστατος συντελεστής που δείχνει τη μείωση της ταχύτητας σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες κύματος, συχνότητας κυμάτων και ανέμου.

$f_{eff(i)}$  = Συντελεστής διαθεσιμότητας της κάθε καινοτόμου τεχνολογίας ενεργειακής αποδοτικότητας.

$f_i$  = Αδιάστατος συντελεστής χωρητικότητας (capacity) που αφορά οποιοδήποτε τεχνικό/ρυθμιστικό περιορισμό στη χωρητικότητα και πρέπει να λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα όταν η αναγκαιότητα του ως παράγοντα δεν είναι δεδομένη.

1. Ο συντελεστής διόρθωσης της ισχύος,  $f_i$ , σε πλοία κλάσης πάγου θα πρέπει να λαμβάνεται ως η μικρότερη τιμή μεταξύ των  $f_{i0}$  και  $f_{i,max}$ , όπως παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, αλλά όχι μικρότερος από το  $f_{i,min} = 1$ .

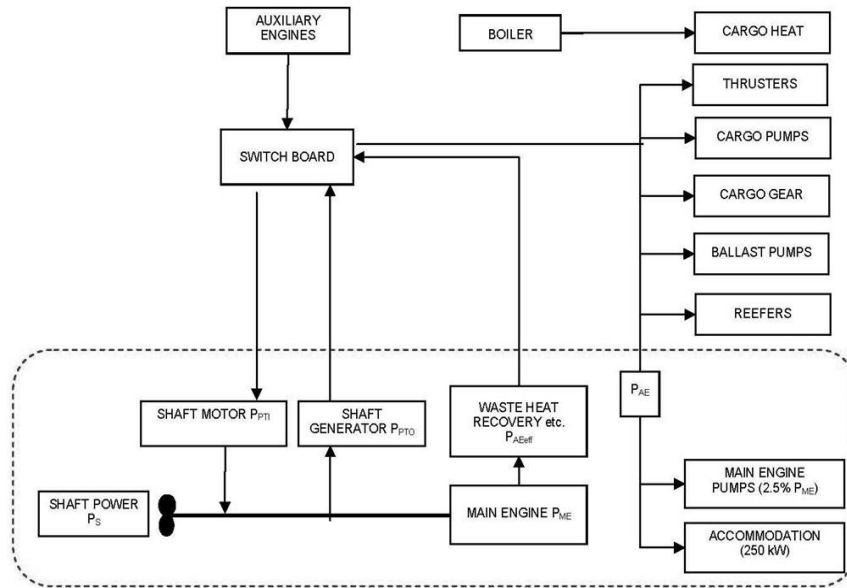
**Πίνακας 1.3:**  $f_{i0}$  και  $f_{i,max}$  για πλοία ειδικού σχεδιασμού

Ship type	$f_{i0}$	$f_{i,max}$			
		IA Super	IA	IB	IC
Tanker	$(0.00138 * L_{PP}^{3.331})$ /Capacity	$2.10 * L_{PP}^{-0.11}$	$1.71 * L_{PP}^{-0.08}$	$1.47 * L_{PP}^{-0.06}$	$1.27 * L_{PP}^{-0.04}$
Bulk carrier	$(0.00403 * L_{PP}^{3.123})$ /Capacity	$2.10 * L_{PP}^{-0.11}$	$1.80 * L_{PP}^{-0.09}$	$1.54 * L_{PP}^{-0.07}$	$1.31 * L_{PP}^{-0.05}$
General Cargo ship	$(0.0377 * L_{PP}^{2.625})$ /Capacity	$2.18 * L_{PP}^{-0.11}$	$1.77 * L_{PP}^{-0.08}$	$1.51 * L_{PP}^{-0.06}$	$1.28 * L_{PP}^{-0.04}$
Container ship	$(0.1033 * L_{PP}^{2.329})$ /Capacity	$2.10 * L_{PP}^{-0.11}$	$1.71 * L_{PP}^{-0.08}$	$1.47 * L_{PP}^{-0.06}$	$1.27 * L_{PP}^{-0.04}$
Gas Carrier	$(0.0474 * L_{PP}^{2.590})$ /Capacity	1.25	$2.10 * L_{PP}^{-0.12}$	$1.60 * L_{PP}^{-0.08}$	$1.25 * L_{PP}^{-0.04}$

**Μήκος μεταξύ καθέτων ( $L_{pp}$ ) :**

Σημαίνει το 96 % του μήκους στην ίσαλο που βρίσκεται στο 85% του ελάχιστου κοίλου μετρημένου από την κορυφή της τρόπιδας ή το μήκος από το μπροστινό μέρος της πλώρης έως τον άξονα του πηδαλίου σε εκείνη την ίσαλο εάν είναι μεγαλύτερο. Σε πλοία που έχουν σχεδιαστεί με επικλινή τρόπιδα, η ίσαλος επί της οποίας υπολογίζεται το μήκος αυτό πρέπει να είναι παράλληλη στην ίσαλο σχεδίασης. Το μήκος  $L_{pp}$  μετράται σε μέτρα.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**



**Σχήμα 1.6 :** Σχηματική αναπαράσταση των αντικειμένων υπολογισμού για τον EEDI

Πηγή: IMO MEPC.1/Circ.681 Annex Interim Guidelines On The Method Of Calculation Of The Energy Efficiency Design Index For New Ships, p.8

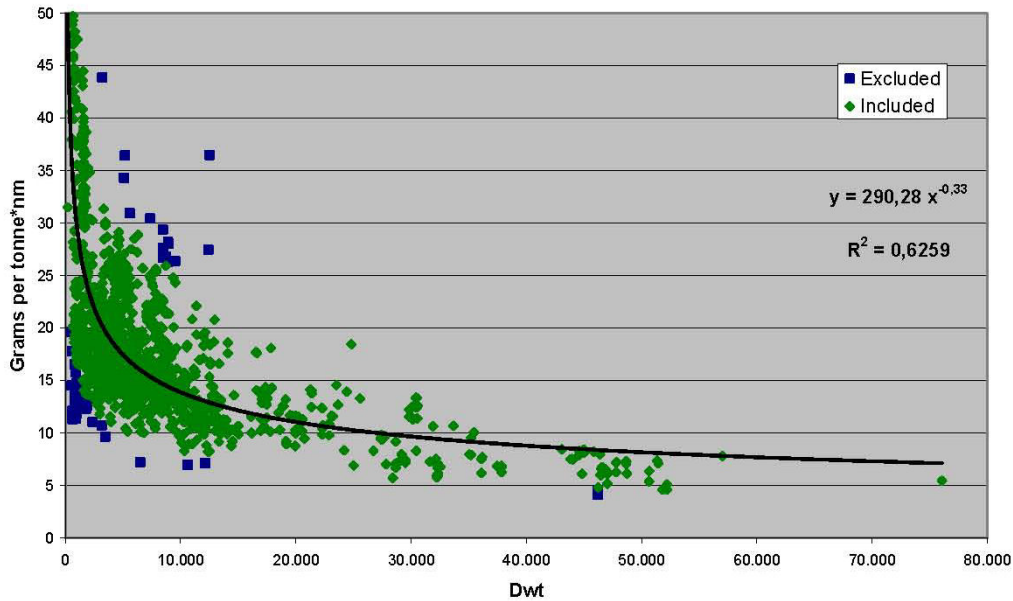
**B) Δείκτης σχεδιασμού απαιτούμενης ενεργειακής απόδοσης (EEDI<sub>BL</sub>).**

Η ανάγκη για μια βασική εκτίμηση των εκπομπών, έτσι ώστε να συγκρίνουμε αν ένα πλοίο έχει σχεδιαστεί αποτελεσματικά σε σύγκριση με μια μέση τιμή αναφοράς, επιχειρήθηκε από τον IMO MEPC με την εισαγωγή ενός δείκτη που ονομάζεται Δείκτης σχεδιασμού απαιτούμενης ενεργειακής απόδοσης (EEDI<sub>BL</sub>).

Με βάση τον τύπο του επιτευχθέντος δείκτη (EEDI<sub>A</sub>), ο IMO μέσω συνόδου MEPC έκανε υποθέσεις για ορισμένους από τους παράγοντες που επηρεάζουν τον υπολογισμό του EEDI<sub>A</sub>, παράγοντας έναν τροποποιημένο τύπο που ονομάζεται "τιμή του μέσου δείκτη". Εφαρμόζοντας τον τύπο υπολογισμού σε ένα ευρύ φάσμα πλοίων εν υπηρεσία του ίδιου τύπου, κατέληξε σε ένα διάσπαρτο X-Y γράφημα των εκπομπών (gCO<sub>2</sub> / t · nm) σε συνάρτηση με τη Χωρητικότητα (DWT), για κάθε κατηγορία πλοίων.

Θεόδωρος Κουτσούρης  
Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώση

General Cargo Ships  
( $\geq 400\text{gt}$ , built 1998 - 2007)



Σχήμα 1.7 : Γραμμή αναφοράς  $EEDI_{BL}$

Πηγή: IMO MEPC GHG-WG 2/2/7 Annex 1, Recalculation Of Energy Efficiency Design Index Baselines For Cargo Ships, 4 February 2009, p.4

Οι παραδοχές σχετικά με τον τύπο του  $EEDI_{BL}$  προκειμένου αυτός να υπολογίζει την «τιμή αναφοράς» (σημείο στη καμπύλη baseline) είναι οι εξής:

- ο συντελεστής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ( $C_F$ ) για όλους τους κινητήρες είναι σταθερός :

$$C_F = 3,1144 \text{ gCO}_2/\text{gF}$$

- η ειδική κατανάλωση καυσίμου για όλους τους τύπους πλοίων είναι σταθερή για τις κύριες μηχανές:

$$SFC_{ME} = 190 \text{ g/kWh} \text{ και για βοηθητικούς κινητήρες } SFC_{AE} = 210 \text{ g/kWh}$$

- $P_{ME(i)} = 0,75 \cdot MCR_{ME(i)}$

- Κανένα από τα πλοία δε χρησιμοποιεί καινοτόμες και ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες ( $P_{eff} = 0$ ) ή σύστημα ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων  $P_{WHR} = 0$

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- Κανένα από τα πλοία δε χρησιμοποιεί ντιζελο-ηλεκτρική πρόωση από τις βοηθητικές μηχανές  $P_{PTI} = 0$
- Όλοι οι συντελεστές διόρθωσης έχουν οριστεί σε  $f_j = f_i = f_w = 1$
- $P_{AE}$  υπολογίζεται μόνο από τους τύπους υπολογισμού που ορίζονται στον υπολογισμό του  $EEDI_A$ .

Τελικά χρησιμοποιείται συγκεκριμένος τύπος για τον υπολογισμό της τιμής του μέσου δείκτη ο οποίος περιλαμβάνει τα παραπάνω μεγέθη.

### **1.2.8 Δείκτης λειτουργίας ενεργειακής απόδοσης (EEOI)**

Η δημιουργία ενός Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Αποτελεσματικότητας (EEDI) είναι μια ενέργεια προς τη σωστή κατεύθυνση λαμβάνοντας υπόψη την προσπάθεια για τη μείωση των εκπομπών από την θαλάσσια βιομηχανία. Όμως ο δείκτης αυτός δεν έχει σχεδιαστεί για να αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των πλοίων κατά τη διάρκεια της εν ζώη λειτουργίας του. Οι πραγματικές εκπομπές που παράγονται από ένα σκάφος μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικές από εκείνες που υποδηλώνει το EEDI. Το γεγονός αυτό, ώθησε την Επιτροπή Προστασίας Θαλασσιού Περιβάλλοντος (MEPC) και το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) στον εντοπισμό και στην ανάπτυξη του μηχανισμού ή των μηχανισμών που απαιτούνται για να επιτευχθεί ο περιορισμός ή η μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) από τη διεθνή ναυτιλία και, με αυτόν τον τρόπο, να δοθεί προτεραιότητα στη δημιουργία ενός κατώτατου ορίου στα εκπεμπόμενα αέρια του θερμοκηπίου, και στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για να περιγραφεί η ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου από πλευράς δείκτη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για το συγκεκριμένο πλοίο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

### **1. Ορισμός του Δείκτη Λειτουργίας Ενεργειακής Απόδοσης (EEOI)**

Στην πιο απλή μορφή του, ο δείκτης λειτουργίας ενεργειακής απόδοσης ή εναλλακτικά ο δείκτης απόδοσης για διοξείδιο του άνθρακα κατά τη μεταφορική

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώωση**

λειτουργία, ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του CO<sub>2</sub> ανά μονάδα ωφέλιμου μεταφορικού έργου.

$$\boxed{EEOI = m_{CO_2} / \text{transport work}} \quad (1.8)$$

**2. Ορισμοί των μεγεθών που περιέχονται στο δείκτη EEOI**

A) Κατανάλωση καυσίμου (FC-Fuel Consumption)

Η κατανάλωση καυσίμου ορίζεται ως η συνολική ποσότητα του καυσίμου που καταναλώθηκε στην ανοιχτή θάλασσα αλλά και στο λιμάνι για ένα ταξίδι ή μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο αναφοράς που μας ενδιαφέρει. Αφορά κύριες και βοηθητικές μηχανές συμπεριλαμβανομένων των λεβήτων και των αποτεφρωτήρων.

B) Διανυθείσα απόσταση (DS-Distance sailed)

Είναι η πραγματική απόσταση που διανύθηκε σε ναυτικά μίλια για ένα ταξίδι ή μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο αναφοράς.

Γ) Είδη πλοίων και φορτίων

Οι κανονισμοί εφαρμόζονται για όλα τα πλοία που εκτελούν μεταφορικό έργο.

1. Πλοία : ξηρού φορτίου, πετρελαιοφόρα, μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, γενικού φορτίου, πλοία ro-ro, επιβατηγά πλοία (συμπεριλαμβανομένων των ro-ro)

2. Φορτία: όλα τα αέρια, υγρό και στερεό φορτίο χύδην, γενικό φορτίο, φορτίο σε εμπορευματοκιβώτια, βαριά φορτία, παγωμένα και κατεψυγμένα προϊόντα, ξυλεία και δασικά προϊόντα, φορτίο μέσα σε φορτηγά οχήματα, αυτοκίνητα και φορτηγά οχήματα σε πλοία ro-ro και επιβάτες (για επιβατηγά και ro-ro επιβατηγά πλοία).

Δ) Μάζα μεταφερόμενου φορτίου

- ✓ Για πλοία ξηρού φορτίου, δεξαμενόπλοια, πλοία ro-ro και πλοία γενικού φορτίου χρησιμοποιούνται οι μετρικοί τόνοι (t) του φορτίου.
- ✓ Για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (αποκλειστικά) χρησιμοποιείται είτε ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων, είτε οι μετρικοί τόνοι της ποσότητας του φορτίου και των κιβωτίων μαζί.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- ✓ Για πλοία που μεταφέρουν συνδυασμό από εμπορευματοκιβώτια και άλλα φορτία χρησιμοποιείται βάρος 10 τόνων για φορτωμένα εμπορευματοκιβώτια και βάρος 2 τόνων για άδεια εμπορευματοκιβώτια.
- ✓ Για επιβατηγά πλοία (συμπεριλαμβανομένων των ro-ro επιβατηγών πλοίων) χρησιμοποιείται ο αριθμός των επιβατών ή η ολική χωρητικότητα του πλοίου σε μονάδες gross tonnes.

Σε μερικές ειδικές περιπτώσεις, η μάζα του μεταφερόμενου φορτίου μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

- ✓ Για πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων ως ο αριθμός των αυτοκινήτων ή το μήκος των λωρίδων που καταλαμβάνουν σε μέτρα.
- ✓ Για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ως ο αριθμός των TEU (γεμάτα και άδεια).
- ✓ Για πλοία μεταφοράς σιδηροδρομικών βαγονιών και πλοία ro-ro ως ο αριθμός των βαγονιών και των φορτηγών οχημάτων ή το μήκος των κατειλημμένων λωρίδων σε μέτρα.

E) Ταξίδι

Το ταξίδι ορίζεται ως η περίοδος μεταξύ της αναχώρησης από ένα λιμάνι και της αναχώρησης από το επόμενο λιμάνι. Εναλλακτικοί ορισμοί θα μπορούσαν επίσης να είναι δεκτοί.

**3. Διαδικασία υπολογισμού του δείκτη EEOI**

- A) Πηγές δεδομένων: Μία πρωτογενής πηγή δεδομένων θα μπορούσε να είναι το ημερολόγιο του πλοίου (ημερολόγιο γέφυρας, ημερολόγιο μηχανής, ημερολόγιο καταστρώματος και άλλα επίσημα έγγραφα)
- B) Συντελεστές μετατροπής της καταναλισκόμενης ποσότητας καυσίμου σε εκπομπές CO<sub>2</sub> (C<sub>F</sub>) : Το C<sub>F</sub> είναι ένας συντελεστής μετατροπής μεταξύ της ποσότητας του καυσίμου που καταναλώνεται σε τόνους και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα επίσης σε τόνους, ανάλογα με την περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα. Οι τιμές για το C<sub>F</sub> παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**Πίνακας 1.1:** Συντελεστής εκπομπής CO<sub>2</sub> για κάθε τύπο καυσίμου

Καύσιμο	Προδιαγραφή καυσίμου	Περιεχόμενο σε C	C <sub>F</sub> (τόνοι CO <sub>2</sub> / τόνοι καυσίμου)
Diesel / Gas oil	ISO 8217 Grades DMX - DMC	0,875	3,20600
Light Fuel oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA - RMD	0,860	3,15104
Heavy Fuel oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME - RMK	0,850	3,11440
Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG)	Προπάνιο/Βουτάνιο	0,819/0,817	3,00000 3,03000
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)		0,75	2,75000

Γ) Τελικός υπολογισμός του δείκτη :

Η έκφραση του EEOI για ένα ταξίδι είναι:

$$\mathbf{EEOI} = ( \sum_j(\mathbf{FC}_j \times \mathbf{C}_{Fj}) ) / ( \mathbf{m}_{\mathbf{CARGO}} \times \mathbf{D} ) \quad (1.9)$$

Για μία περίοδο ή έναν αριθμό ταξιδιών η έκφραση γίνεται :

$$\mathbf{EEOI}_{\mathbf{Average}} = ( \sum_i \sum_j(\mathbf{FC}_{ij} \times \mathbf{C}_{Fj}) ) / ( \sum_i(\mathbf{m}_{\mathbf{CARGO}i} \times \mathbf{D}_i) ) \quad (1.10)$$

Όπου

- j ο τύπος του καυσίμου
- i ο αριθμός του ταξιδιού
- FC<sub>ij</sub> η ποσότητα του καταναλισκόμενου καυσίμου j στο ταξίδι i
- m<sub>CARGO</sub> η μάζα του μεταφερόμενου φορτίου (όπως ορίστηκε παραπάνω)
- D<sub>i</sub> η διανυθείσα απόσταση σε ναυτικά μίλια

**Θεόδωρος Κουτσούρης**

**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- Οι μονάδες του δείκτη εξαρτώνται, προφανώς, από τις μονάδες που χρησιμοποιούνται για το μεταφερόμενο φορτίο και μπορεί να είναι μία από τις παρακάτω:

$$\boxed{t_{CO_2} / (t \times nm)}, \quad \boxed{t_{CO_2} / (TEU \times nm)}, \quad \boxed{t_{CO_2} / (person \times nm)}$$

κλπ.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> – ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ**

### **(ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ**

### **ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΣΕ LNG ΠΛΟΙΑ)**

#### **2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ**

##### **2.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ**

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως ντήζελ, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες ντήζελ, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλ. γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν “prime movers” (‘κινητήριες μηχανές’). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση-εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων.

##### **2.1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**

Μία σειρά πειραματικών εφαρμογών ηλεκτρικής πρόωσης πραγματοποιήθηκαν στο τέλος του 19ου αιώνα σε Ρωσία και Γερμανία όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης τροφοδοτούταν απευθείας από συστοιχίες συσσωρευτών. Η πρώτη γενιά ηλεκτροπρόωσης εφαρμόστηκε περί το 1920. Ήταν αποτέλεσμα του μεγάλου ανταγωνισμού για μείωση του χρόνου των υπερατλαντικών ταξιδιών, μεταξύ των ναυτιλιακών εταιριών επιβατηγών πλοίων. Η μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης καλύπτονταν τότε από στρόβιλο – ηλεκτρικά συστήματα. Το πλοίο S/S Normandie (Εικ.2.1) χρησιμοποιούσε ένα τέτοιο σύστημα, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον Ατλαντικό Ωκεανό (1935) κινούμενο με 30 και πλέον κόμβους. Στρόβιλοι ατμού τροφοδοτούσαν τους σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες ισχύος 29 MW σε καθέναν από τους τέσσερις άξονες μετάδοσης κίνησης.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Η περιστροφική ταχύτητα δινόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Σε κανονική λειτουργία οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν κάθε μηχανή πρόωσης ξεχωριστά, υπήρχε όμως και η δυνατότητα τροφοδότησης δύο μηχανών από μία γεννήτρια για ταξίδι χαμηλότερης ταχύτητας.



**Εικόνα 2.1 S/S Normandie (1935)**

*Πηγή: Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία «Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές – Μελέτη και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος», Νικόλαος Γ.Μπαϊραχτάρης*

Με την εισαγωγή των μηχανών Diesel στο μέσο του 20ου αιώνα, η τεχνολογία ατμοστροβίλων και η ηλεκτρική πρόωση εξαφανίστηκαν λίγο πολύ από την εμπορική ναυτιλία μέχρι τη δεκαετία του '80. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος και συγκεκριμένα των συστημάτων οδήγησης των ηλεκτρικών κινητήρων, έφεραν τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα πάλι στα πλοία. Αρχικά περί το 1970 μέσω των ανορθωτών (E.P./Σ.Ρ.) για τον έλεγχο μηχανών πρόωσης Σ.Ρ. και στη συνέχεια το 1980 με τη χρήση των μετατροπέων E.P./E.P. για τον έλεγχο μηχανών E.P., έχουμε τη δεύτερη γενιά ηλεκτροπρόωσης. Το προωστήριο σύστημα τροφοδοτείται πλέον από ένα ισχυρό δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας. Μέσω του ελέγχου των στροφών των ηλεκτρικών κινητήρων στρέφονται οι έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP). Αυτές οι λύσεις αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε ειδικές κατηγορίες πλοίων όπως ερευνητικά και παγοθραυστικά πλοία αλλά και σε

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

κρουαζιερόπλοια. Το “S/S Queen Elizabeth II”, μετατράπηκε σε ηλεκτροκίνητο περί το 1975, στη συνέχεια ακολούθησαν και άλλα πλοία όπως τα κρουαζιερόπλοια Fantasy και Princess, shuttle tankers κ.α.. Σημειωτέον, στην άμεσα οδηγούμενη πετρελαιοκίνητη πρόωση η ώση συνήθως ελέγχεται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος αλλαγής του βήματος των ελίκων. Οι έλικες αυτές είναι γνωστές ως έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP). Το 1990 έκανε την εμφάνισή του το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (podded propulsion). Σε αυτό ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται μέσα σε μια λοβοειδή κατασκευή ποντισμένη στη θάλασσα. Η έλικα, που είναι απευθείας συνδεδεμένη με τον κινητήρα, είναι σταθερού βήματος και το όλο σύστημα έχει τη δυνατότητα περιστροφής κατά 360ο προσφέροντας στο πλοίο ευκινησία και ευελιξία (maneuverability). Από την πρώτη εφαρμογή στο κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” (εικόνα 2.2), τα αποτελέσματα ήταν τόσο ενθαρρυντικά ώστε να καθιερωθεί η αζιμουθιακή πρόωση στα νέα κρουαζιερόπλοια.



***Εικόνα 2.2** Κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” με αζιμωδ (κάτω δεξιά) με σημαντικό ελεύθερο χώρο.*

*Πηγή: Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία «Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές – Μελέτη και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος», Νικόλαος Γ.Μπαϊραχτάρης*

### **2.1.3 ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ Η ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ**

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πριν από περίπου 55 χρόνια. Για μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συννά συστήματα Ward-Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς ρεύματος και κίνηση με συνεχές ρεύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ.. Κατά την τελευταία εικοσαετία, η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ (με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος), που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία.

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνον πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων), κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κ.λπ.. Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

*α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελικτικών ικανοτήτων.*

Οχηματαγωγά, παγοθραυστικά, ρυμουλκά, ωκεανογραφικά, σκάφη πόντισης καλωδίων είναι τυπικά παραδείγματα σκαφών αυτής της κατηγορίας. Στις περιπτώσεις αυτές, η μεταβολή της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας είναι συχνά ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη λειτουργία του σκάφους.

*β. Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.*

Σκάφη με δικά τους μέσα φόρτο – εκφόρτωσης, πυροσβεστικά σκάφη, μεγάλα δεξαμενόπλοια, κ.ά. έχουν μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων, που δε συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη ισχύ πρόωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν ορισμένα δεξαμενόπλοια (π.χ. εκείνα που μεταφέρουν πετρέλαιο από τις εξέδρες εξόρυξης στη στεριά), τα οποία ξοδεύουν μεγάλο μέρος του χρόνου στη φόρτωση (4 – 10 μέρες) ενώ το ταξίδι είναι σχετικά σύντομο. Κατά τη διάρκεια της φόρτωσης η ηλεκτρική ισχύς, που απαιτείται για την κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων, μπορεί να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ισχύ πρόωσης.

*γ. Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης.*

Τέτοιες συνθήκες παρουσιάζονται σε μεγάλα επιβατηγά πλοία και ιδιαίτερα στα κρουαζιερόπλοια, όπου οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις άνεσης και

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

εξυπηρέτησης των επιβατών συντελούν σε αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία αρχίζει να αποτελεί σοβαρό ποσοστό της ισχύος πρόωσης φθάνοντας το 30 – 40 %. Επιπλέον, τα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια έχουν μέγιστη ταχύτητα 21 – 22 κόμβων, στην οποία ταξιδεύουν κατά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ κατά το μεγαλύτερο χρόνο κινούνται με ταχύτητα 9 – 14 κόμβων.

δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.

Οι αεριοστρόβιλοι και πολλές ταχύστροφες μηχανές Diesel έχουν σταθερή φορά περιστροφής και συχνά εγκαθίστανται δύο, τρεις ή και περισσότερες μονάδες, που παράγουν την απαιτούμενη συνολική ισχύ. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει έναν εύκολο τρόπο (ηλεκτρικής και όχι μηχανικής) σύνδεσης ενός κινητήρα πρόωσης με πολλές κύριες μηχανές, καθώς και ρύθμισης της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας.

ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Ηλεκτρική ενέργεια αποθηκευμένη σε συσσωρευτές καθώς και συστήματα κυψελών καυσίμου πρόσφατης τεχνολογίας χρησιμοποιούνται για την κίνηση ενός ή περισσότερων κινητήρων πρόωσης του σκάφους με σχετικά χαμηλή ταχύτητα.

Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την βασική επιλογή για την κίνηση των Υποβρυχίων. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς και των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Οι αυξημένες απαιτήσεις και οι αυστηρότερες - σε σχέση με τα εμπορικά πλοία -προδιαγραφές των πολεμικών ναυτικών, (τόσο από απόψεως περιορισμών χώρου αλλά και απαιτήσεων του προωστήριου συστήματος), προϋποθέτουν περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση υποσυστημάτων για να πραγματοποιηθούν τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης.

Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος των πολεμικών ναυτικών για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης είναι :

- α.** η αύξηση των ηλεκτρικών καταναλωτών στα πλοία και η τάση για την ‘ηλεκτροποίηση’ των πλοίων (με αποκορύφωση το **Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο-All Electric Ship-AES**), δηλαδή η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να γίνονται πλέον από ηλεκτρικά συστήματα και μηχανήματα (αντικαθιστώντας π.χ. υδραυλικά, μηχανικά ή συστήματα ατμού κ.λ.π.),

- β. η ανάγκη για περισσότερο ‘αθόρυβη’ λειτουργία των πλοίων ,
- γ. η αναζήτηση προωστήριων συστημάτων με χαμηλότερο κόστος ζωής και μειωμένες απαιτήσεις επανδρώσεως,
- δ. και κυρίως η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθεί το πλήρες δυναμικό της ηλεκτροπρόωσης. Τέτοιες τεχνολογίες είναι κυρίως των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχό τους.

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλ. το σύστημα των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών που επαυξάνουν την ελικτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5-2.5 MW).

#### **2.1.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία οφείλεται και η διάδοσή της στις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, είναι τα ακόλουθα:

- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0- 100 %.
- Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μία να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
- Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- Περιορισμός των εκπεμπομένων ρύπων διότι:
  - α. η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,
  - β. ιδιαίτερα οι εκπομπές NOx είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.
- Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενοπλοίων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του.
- Ουσιαστική μείωση του μήκους του αξονικού συστήματος του πλοίου.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής:

- Υψηλό κόστος επένδυσης. Αυτό γίνεται η προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν, αξιοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία των ηπειρωτικών ηλεκτρικών δικτύων (Commercial Off The Shelf – COTS), ωστόσο το υψηλό κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δεν δείχνει να υπερκερνάται εύκολα.
- Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Π.χ., σε συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel - έλικα ρυθμιζόμενου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4%: 2% στην έλικα και 2% στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος. Σε εγκατάσταση νηξέλο-ηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 - 8%: 3% στις γεννήτριες, 2% στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2 - 3% στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.
- Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεως. Οι αρμονικές αυτές αφενός προσαυξάνουν τη συνολική

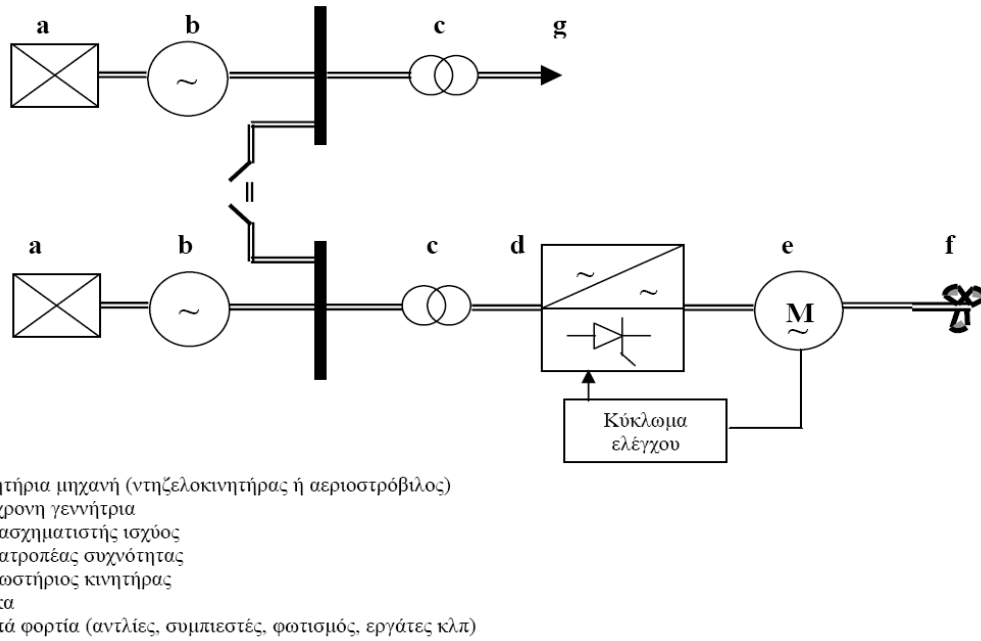
κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Έτσι ο "ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος" που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις –πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος – ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες για ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σειρά αυτή των προβλημάτων λόγω της εξηλέκτρισης των συστημάτων του πλοίου αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες αναλύσεις και μελέτες κυρίως κατά της φάση της σχεδίασης τους ηλεκτρολογικού συστήματος.

Σε πολλές εφαρμογές, η συνισταμένη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων είναι θετική, οπότε η ηλεκτρική πρόωση είναι η ενδεδειγμένη λύση, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (μειωμένο πλήρωμα, οικονομικότερη συντήρηση, γρηγορότερα ταξίδια, μη αναγκαιότητα ρυμούλκησης κοκ).

### **2.1.5 ΔΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**

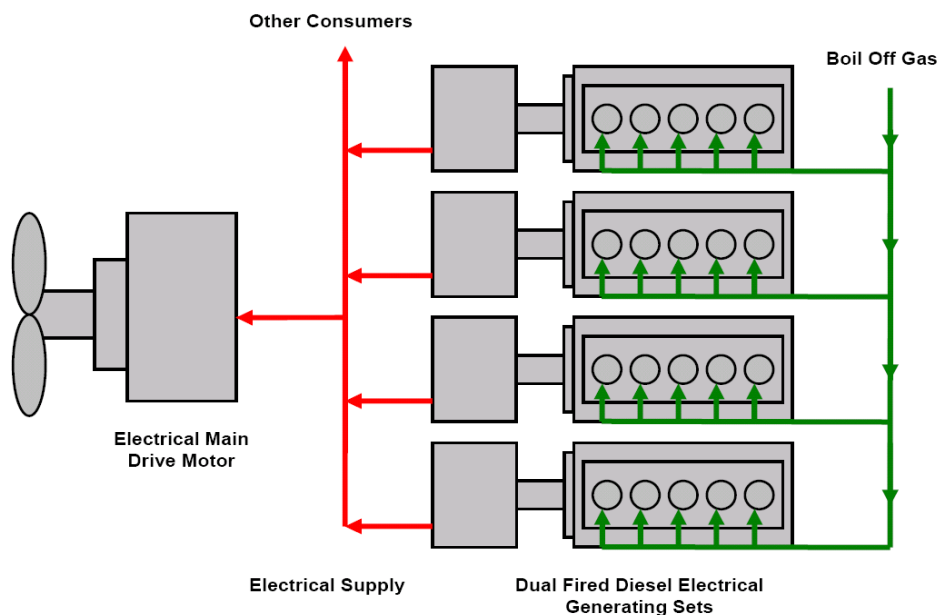
Το γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ηλεκτρική πρόωση απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα (σχήμα 3). Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι ενιαίο καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ή μπορεί να αποτελείται από δύο επιμέρους υποσυστήματα, αυτό της ηλεκτροπρόωσης και εκείνο των λοιπών ηλεκτρικών φορτίων.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**



**Εικόνα 2.3:** Γενικό διάγραμμα συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου.

Πηγή: Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία «Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές – Μελέτη και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος», Νικόλαος Γ.Μπαϊραχάρης



**Εικόνα 2.4:** Dual Fuel Diesel Electric propulsion system

Πηγή:  
<http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SNAME/ce7dbd62-cb5f-4739-abc2-44ac55b35df0/UploadedImages/Teekay%20Sname%20Presentation%20rev3.pdf>

### **2.1.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μία αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία που συνεχώς κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια μεταξύ των άλλων λόγω και της γενικά εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και κυρίως στον τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος. Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτροπρόωσης.

## **2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΩΣΗ ΓΙΑ ΠΛΟΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (LNG CARRIERS)**

### **2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η ναυτιλιακή αγορά του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (Liquefied Natural Gas - LNG) αποτελεί τα τελευταία χρόνια χωρίς αμφιβολία μια πολύ ενδιαφέρουσα περιοχή στις θαλάσσιες μεταφορές ενέργειας, οι οποίες κυριαρχούν στην παγκόσμια ναυτιλία προϊόντων χύδην. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την ανθρωπότητα. Στους ενεργειακούς κύκλους είναι γνωστό ότι το Φυσικό Αέριο (ΦΑ) θα αποτελέσει τον διάδοχο του πετρελαίου στον 21ο αιώνα και η Ναυτιλία, που αποτελεί την βάση του παγκοσμίου εμπορίου, καλείται να ανταποκριθεί στις νέες προκλήσεις.

Παραδοσιακά, η πρόωση των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου γινόταν με ατμοστροβίλους, καθώς η λύση αυτή έχει αποδειχθεί απλή και αξιόπιστη για τέτοιου είδους πλοία. Ωστόσο η σχετικά χαμηλή απόδοση του συστήματος πρόωσης (<30%) και η συνεχής αύξηση του μεγέθους των πλοίων μεταφοράς LNG έχουν πλέον οδηγήσει στη διάδοση της χρήσης ηλεκτρικής πρόωσης για την κίνηση αυτών των πλοίων.

Με την ανάπτυξη των μηχανών διπλού καυσίμου (dual fuel engines), οι οποίες μπορούν να λειτουργούν τόσο με πετρέλαιο όσο και με φυσικό αέριο, η ηλεκτρική

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

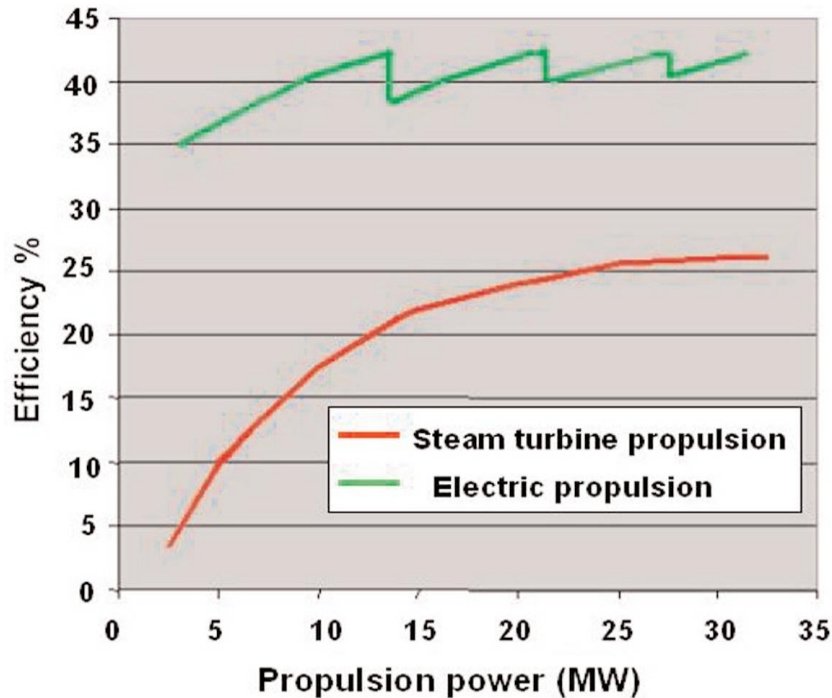
πρόωση έχει καταστεί μία ελκυστική λύση λόγω της αυξημένης αποδοτικότητας, της αυξημένης χωρητικότητας φορτίου και της μείωσης των λειτουργικών δαπανών. Το αέριο boil-off (ατμοποιημένο LNG-boil off gas) χρησιμοποιείται απ'ευθείας σε μεσόστροφες μηχανές και η ισχύς πρόωσης μεταφέρεται στις προπέλες μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης πρόωσης. Άλλα βασικά κριτήρια για την επιλογή ενός συστήματος πρόωσης είναι η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία του εξοπλισμού πρόωσης. Τα πλοία μεταφοράς LNG έχουν χρονοναυλώσεις μεγάλης διάρκειας με συγκεκριμένα χρονοδιαγράμματα η μη τήρηση των οποίων σημαίνει υψηλά πρόστιμα. Η διαθεσιμότητα του συμβατικού αμοστροβίλου είναι αποδεδειγμένα πολύ υψηλή και οποιαδήποτε εναλλακτική λύση, εν προκειμένω η λύση της ηλεκτροπρόωσης οφείλει να παρέχει τουλάχιστον το ίδιο επίπεδο διαθεσιμότητας. Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης με χρήση αξιόπιστων εξαρτημάτων πληρούν το κριτήριο αυτό της διαθεσιμότητας και μάλιστα πολύ πιο αποτελεσματικά από τα συστήματα συμβατικής πρόωσης.

### **2.2.2 ΛΟΓΟΙ ΧΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ LNG**

#### 1. Υψηλότερος βαθμός απόδοσης κατά την πρόωση:

Σε ονομαστικό φορτίο λειτουργίας, ο τυπικός βαθμός απόδοσης μιας μηχανής dual fuel είναι περίπου 47%. Συμπεριλαμβανομένων των απωλειών μετάδοσης που είναι περίπου 8-10%, ο ολικός βαθμός απόδοσης από την κατανάλωση του καυσίμου έως την τελική ισχύ που φτάνει στην έλικα είναι περίπου 43%. Ο τυπικός βαθμός απόδοσης για πρόωση ατμού είναι λιγότερο από 30%. Για καταστάσεις λειτουργίας μερικού φορτίου, όπως η λειτουργία σε κατάσταση ελιγμών ή η λειτουργία σε περιοχές με περιορισμούς της ταχύτητας, η διαφορά στο βαθμό απόδοσης μεταξύ συμβατικής πρόωσης και ηλεκτροπρόωσης είναι ακόμη μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από αρκετές μηχανές οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και πάντα επιλέγεται η λειτουργία ενός βέλτιστου αριθμού κινητήριων μηχανών ώστε να πληρείται η απαίτηση ισχύος από το πλοίο. Ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 2.5.

Θεόδωρος Κουτσούρης  
Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση



*Σχήμα 2.5: Βαθμός απόδοσης από την παροχή του καυσίμου έως τον άξονα της προπέλας ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης διπλού καυσίμου (dual fuel electric propulsion plant) σε σύγκριση με ένα σύστημα συμβατικής πρόωσης (steam propulsion plant).*

Πηγή:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c1256cc400313660c125721a002947b8/\\$file/article\\_el%20prop%20for%20lng%20carriers\\_10\\_04.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c1256cc400313660c125721a002947b8/$file/article_el%20prop%20for%20lng%20carriers_10_04.pdf)

## 2. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς:

Στα πλοία μεταφοράς LNG συμβατικής πρόωσης υπάρχουν 3-4 βοηθητικές γεννήτριες για τη διαχείριση του φορτίου. Η συνολική ισχύς είναι περίπου 10-12 MW με εγκαταστάσεις μέσης τάσης. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ισχύος χρησιμοποιείται μόνο όταν το πλοίο είναι στο λιμάνι κατά τη διαδικασία εκφόρτωσης του φορτίου.

Στα πλοία με ηλεκτρική πρόωση, χρησιμοποιείται μία κοινή μονάδα παραγωγής για τις καταστάσεις πρόωσης και εκφόρτωσης του φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ποσότητα της εγκατεστημένης ισχύος μπορεί να μειωθεί καθώς οι ανάγκες ισχύος για πρόωση και οι ανάγκες ισχύος για εκφόρτωση φορτίου αφορούν δύο ανεξάρτητα χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, ένα LNG με απαίτηση ισχύος πρόωσης 26 MW και ισχύος εκφόρτωσης φορτίου 10 MW θα απαιτούσε περίπου 39 MW συνολικής εγκατεστημένης ισχύος (με 10% περιθώριο

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

ισχύος) εάν αναφερόμαστε σε συμβατική πρόωση. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρική πρόωση, ο παράγοντας διαστασιολόγησης για την εγκατάσταση ισχύος θα είναι η ισχύς πρόωσης συν το φορτίο του πλοίου σε υπηρεσία. Υποθέτοντας ένα φορτίο υπηρεσίας ίσο με 2500 kW, θα είναι τυπικά περίπου 35 MW (περιλαμβάνοντας 8% ηλεκτρικές απώλειες και 10% περιθώριο ισχύος). Έτσι λοιπόν η τελική μείωση στην εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με τη συμβατική πρόωση θα είναι περίπου 11%.

3. Ηλεκτρική μετάδοση μεταβλητής ταχύτητας:

Ένας ηλεκτρικός κινητήρας ελεγχόμενης ταχύτητας (μέσω μετατροπέα συχνότητας) έχει μέγιστη ροπή διαθέσιμη από τις ελάχιστες έως τις μέγιστες στροφές λειτουργίας. Το εύρος στροφών κυμαίνεται από μέγιστες αρνητικές σε μέγιστες θετικές. Ο μετασχηματιστής υπάρχει για να προστεύει τα μηχανικά μέρη ρυθμίζοντας ανάλογα με τις συνθήκες τη ροπή και την αυξομείωση της ισχύος.

Με τέτοιες δυνατότητες στο σύστημα πρόωσης, υπάρχει μία θετική επίδραση στην ικανότητα ελιγμών και σε καταστάσεις επείγουσας κράτησης. Σε ό,τι αφορά τη δυνατότητα ελιγμών, η επίδραση είναι άκρως θετική καθώς η έλικα μπορεί να περιστραφεί σε οποιοδήποτε αριθμό στροφών, ο οποίος μπορεί να μεταβάλλεται γρήγορα, διότι υπάρχει η δυνατότητα να αποδίδεται πλήρης ροπή σε οποιοδήποτε αριθμό στροφών. Σε ό,τι αφορά τις καταστάσεις επείγουσας κράτησης, υπάρχει μεγάλη βελτίωση καθώς ο ηλεκτρικός κινητήρας και ο μετασχηματιστής έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν αντίστροφη ισχύ από την έλικα μέσω ηλεκτρικής πέδησης και συνεπώς μπορούν να αλλάζουν τη φορά περιστροφής της έλικας ταχύτερα συγκριτικά με το συμβατικό σύστημα πρόωσης ατμού.

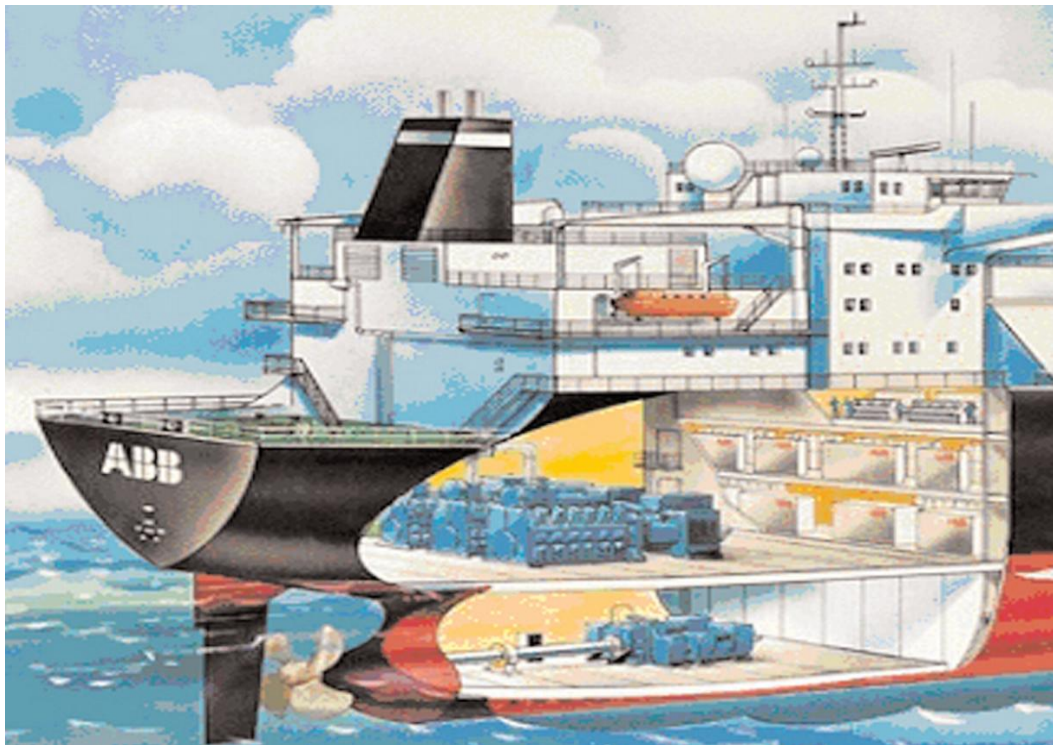
4. Διαθεσιμότητα (Redundancy):

Στην ηλεκτροπρόωση υπάρχει πολύ εύκολα η δυνατότητα να υφίσταται διαθεσιμότητα της τάξεως του 50% στο κομμάτι της ηλεκτρικής ισχύος. Δηλαδή, τουλάχιστον δύο ξεχωριστοί προωστήριοι κινητήρες με ξεχωριστή τροφοδοσία (μετατροπέας + μετασχηματιστής) και τουλάχιστον ένας πίνακας ισχύος (switchboard) δύο χωριστών τμημάτων. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, η διαθέσιμη ροπή ή ισχύς πρόωσης θα είναι τουλάχιστον 50% της μέγιστης μετά από μία αστοχία στο ηλεκτρικό σύστημα. Η συνέπεια της απώλειας ταχύτητας του πλοίου είναι, ωστόσο, πολύ χαμηλότερη και τυπικά το πλοίο είναι σε θέση να λειτουργεί με

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

μία ταχύτητα όχι μικρότερη από το 70% της μέγιστης, σε περίπτωση οποιασδήποτε βλάβης στο ηλεκτρικό σύστημα.

Η διαθεσιμότητα αυτή και η αξιοπιστία διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο για ένα πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Σκοπός για τα πλοία αυτά είναι να παραδωθεί το εμπόρευμα (LNG) στον εκάστοτε τερματικό σταθμό την προγραμματισμένη ώρα. Λόγω της περιορισμένης δυνατότητας αποθήκευσης στον τερματικό σταθμό, ολόκληρο το σύστημα παροχής υγροποιημένου φυσικού αερίου βασίζεται στην τακτική και με χρονική ακρίβεια άφιξη των πλοίων μεταφοράς LNG. Επιπλέον, τα πλοία αυτά ναυλώνονται για 20-30 χρόνια έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μία σταθερή και αξιόπιστη παροχή LNG. Σύμφωνα λοιπόν με αυτόν τον στόχο για συνεχή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία, το σύστημα πρόωσης δεν επιτρέπεται να αποτύχει, γεγονός που θα καθυστερήσει την άφιξη του πλοίου στον τερματικό σταθμό.



**Σχήμα 2.6:** Τοπική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης

Πηγή:

[http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c1256cc400313660c125721a002947b8/\\$file/article\\_e1%20prop%20for%20lng%20carriers\\_10\\_04.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c1256cc400313660c125721a002947b8/$file/article_e1%20prop%20for%20lng%20carriers_10_04.pdf)



### **2.2.3 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ-ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ LNG**

Το φυσικό αέριο ως καύσιμο για τα πλοία είναι αποδοτικότερο, καθαρότερο, λιγότερο θορυβώδες και λιγότερο διαβρωτικό από τα «παραδοσιακά» ναυτικά καύσιμα. Το φυσικό αέριο είναι ένα εξαιρετικό καύσιμο για μηχανές εσωτερικής καύσης, λόγω των ιδιοτήτων που έχει ως καύσιμο και οι οποίες επιτρέπουν το σχεδιασμό κινητήρων αερίου υψηλής αποδοτικότητας και χαμηλών εκπομπών ρύπων. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται ως καύσιμο πλοίου είναι:

- Υψηλός αριθμός μεθανίου που επιτρέπει υψηλούς λόγους συμπίεσης
- Εύκολα αναμιγνύεται με αέρα για να ληφθεί ένα ομογενές μίγμα το οποίο καίγεται με υψηλή ταχύτητα φλόγας ακόμα και σε μεγάλες παροχές αέρα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις κατά την καύση, με αποτέλεσμα τις μειωμένες εκπομπές NOx έως και 90% σε σύγκριση με το πετρέλαιο.
- Δεν περιέχει θείο, συνεπώς οι εκπομπές SOx είναι μηδενικές.
- οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων (particulate matter-PM) είναι μηδενικές.

Το φυσικό αέριο, με κύριο συστατικό του το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), είναι ένα μόριο απλής δομής το οποίο, κατά την καύση του, αποδίδει λιγότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με τα πιο πολύπλοκα μόρια των υγρών καυσίμων (όπως του πετρελαίου). Στοιχειομετρική καύση του φυσικού αερίου αποδίδει 9.5% CO<sub>2</sub>, ενώ το πετρέλαιο (diesel) αποδίδει 13.4% CO<sub>2</sub>. Η απλότητα των συστατικών των μορίων και η απουσία θείου στο φυσικό αέριο έχει, επίσης, ως αποτέλεσμα την αποφυγή εκπομπών σωματιδίων (PM). Ακολούθως, στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι εκπομπές αερίων ρύπων για τα πλοία από την καύση του φυσικού αερίου και άλλων υγρών καυσίμων. Οι εκπομπές είναι συναρτήσεις της ισχύος της μηχανής σε kWh (για τυπικές μεσόστροφες μηχανές χωρίς καθαρισμό των καυσαερίων που κατασκευάστηκαν μετά το 2000).

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**Πίνακας 2.1:** Εκπομπές διαφόρων ρύπων ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου

Πηγή: <http://www.chart-ferox.com/systems/systems-lng-systems-ship-refueling.htm>

Fuel Type	SOx (gr/kWh)	NOx (gr/kWh)	PM (gr/kWh)	CO <sub>2</sub> (gr/kWh)
Residual oil 3.5% sulphur	13	9-12	1.5	580-630
Marine diesel oil, 0.5%S	2	8-11	0.25-0.5	580-630
Gasoil, 0.1% sulphur	0.4	8-11	0.15-0.25	580-630
Natural Gas (LNG)	0	2	~0	430-480

Η σύσταση του φυσικού αερίου διαφέρει ανάλογα με τη χώρα προέλευσης. Τυπικές συστάσεις για το LNG (βασικότερα συστατικά) φαίνονται ακολούθως:

**Πίνακας 2.2:** Σύσταση φυσικού αερίου ανάλογα με τη χώρα προέλευσής του

Πηγή:

<http://www.chemeng.ntua.gr/courses/pngtech/files/Natural%20Gas%20Properties.>

	Ολλανδία Groningen	Νορβηγία, Ekofisk	Γερμανία Söhlingen	Γερμανία Süd- Oldenburg	ΗΠΑ Panhandle Texas	Ινδονησία Arun
CH <sub>4</sub> (%κ.ο.)	81	85	85	77	73.2	75
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (%κ.ο.)	2.8	8.4	1.5	0.1	6.1	5.5
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (%κ.ο.)	0.4	2.9	0.07		3.2	2.3
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (%κ.ο.)	0.2	1.0	0.03		1.6	1.1
C <sub>5+</sub> (%κ.ο.)	0.1	0.15	2 g/cm <sup>3</sup> C <sub>8+</sub>		0.6	0.75
N <sub>2</sub> (%κ.ο.)	14.3	0.4	12.5	7	14.3	0.3
CO <sub>2</sub> (%κ.ο.)	0.9	2	0.5	8	0.3	15

#### **2.2.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών δίνεται πλέον ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση «καθαρότερων» καυσίμων. Η χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου ως καύσιμο στα πλοία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά τις εκπομπές NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> συνδέονται άρρηκτα με την κατανάλωση καυσίμου και σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα του LNG, σε σύγκριση με το μαζούτ (HFO) και το ναυτιλιακό πετρέλαιο (MDO), υπάρχει ένα σαφές πλεονέκτημα για το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης στα πλοία μεταφοράς LNG. Σε ό,τι αφορά άλλους τύπους (πλην υγραεριοφόρων) πλοίων, ήδη εμφανίζονται μελέτες εγκατάστασης δεξαμενών LNG. Η ανάγκη αποδέσμευσης από το πετρέλαιο και η χρήση «καθαρότερων» καυσίμων αναμένεται να καταστήσει επιτακτική την ανάγκη της χρήσης του LNG σε συνδυασμό με την ηλεκτροπρόωση στα περισσότερα είδη πλοίων τα επόμενα χρόνια.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΕΟΙ- EEDI

### 3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΕΟΙ

#### 3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας για τη λειτουργία τριών πλοίων. Πρόκειται για τα εξής πλοία:

*A) Ηλεκτρικής πρόωσης πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου Φ.αερίου (ΠΛΟΙΟ 1).*

*B) Συμβατικής πρόωσης πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου Φ. αερίου (ΠΛΟΙΟ 2).*

*Γ) Δεύτερο πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου Φ.αερίου ηλεκτρικής πρόωσης (ΠΛΟΙΟ 3-υπό κατασκευή).*

Παρόλο που είναι γνωστό ότι ο δείκτης EEDI δεν εφαρμόζεται ακόμη σε ηλεκτροκίνητα πλοία, έγινε μία πρώτη προσέγγιση του δείκτη για ηλεκτροκίνητα πλοία. Τα 3 πλοία αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά ( $V_{ref, capacity}$ ), επομένως πρόκειται για «αδελφά» πλοία, η σύγκριση μεταξύ των οποίων είναι αποδεκτή.

Σε ό,τι αφορά τα δύο πρώτα πλοία εξασφαλίστηκαν πλήρη στοιχεία ταξιδιού επομένως γίνεται αξιοποίηση των στοιχείων αυτών για τον υπολογισμό του δείκτη EEOI. Τα στοιχεία ταξιδιού αφορούν ταξίδια μέσα στο 2012 από τον Ιανουάριο έως και το Νοέμβριο και περιλαμβάνουν πλήρη δεδομένα για την κατανάλωση καυσίμου, τις εκπομπές ρύπων, την ταχύτητα πλεύσης και την απόσταση πλεύσης για κάθε ταξίδι. Υπήρξε ενημέρωση από την πλοιοκτήτρια εταιρία ότι στα πλοία αυτά δεν υπήρχαν εγκατεστημένοι κάποιοι μετρητές για τον προσδιορισμό της ποσότητας των εκπεμπόμενων ρύπων. Ωστόσο, έχοντας δεδομένα για την κατανάλωση καυσίμου και χρησιμοποιώντας συντελεστές μετατροπής προέκυψαν οι εκπομπές ρύπων για κάθε ταξίδι. Για το πλοίο 3 δεν υπάρχουν ακόμη στοιχεία ταξιδιού, καθώς πρόκειται για πλοίο υπό κατασκευή, του οποίου η παράδοση αναμένεται τον Ιούλιο του 2013. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός σε αυτήν την περίπτωση γίνεται προχωρώντας σε

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

υποθέσεις σχετικά με τα εμπλεκόμενα στο δείκτη μεγέθη (επομένως εκτιμάται προσεγγιστικά μία τιμή για το δείκτη EEOI).

Έχοντας, λοιπόν, ως δεδομένα την ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων του διοξειδίου του άνθρακα ( $m_{CO_2}$ ) σε τόνους (tons), την ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου ( $m_{CARGO}$ ) σε τόνους (tons) και τη διανυθείσα απόσταση ( $D$ ) σε ναυτικά μίλια (nm), γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη EEOI σύμφωνα με τη γνωστή σχέση:

$$\boxed{EEOI = m_{CO_2} / transport\ work} \quad (3.1)$$

δηλαδή:

$$\boxed{EEOI = m_{CO_2} / (m_{CARGO} \times D)} \quad (3.2)$$

Όπου:

- $m_{CARGO}$  η μάζα του μεταφερόμενου φορτίου (mt DWT)
- $D$  η διανυθείσα απόσταση σε ναυτικά μίλια
- $m_{CO_2}$  η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων  $CO_2$  σε tons

### **3.1.2 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ**

#### **3.1.2.1 Diesel electric propulsion LNG carrier No 1 (ΠΛΟΙΟ 1)**

Από τα δεδομένα είναι γνωστές οι επιμέρους εκπομπές ρύπων  $CO_2$ , για κάθε ένα ταξίδι, λόγω της καύσης των ακόλουθων καυσίμων : BOG (Boil Off Gas), HFO (Heavy Fuel Oil), MDO (Marine Diesel Oil) και MGO (Marine Gas Oil). Αθροίζοντας λοιπόν τις 4 παραπάνω ποσότητες προκύπτει η συνολική ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων  $CO_2$  για το κάθε ταξίδι. Επιπλέον, δίνεται η διανυθείσα απόσταση για κάθε ταξίδι σε ναυτικά μίλια. Το DWT του πλοίου είναι και αυτό γνωστό και ίσο με 82338.9 tons. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τα 10 πιο πρόσφατα ταξίδια του πλοίου από το Φεβρουάριο του 2012 έως και το Νοέμβριο του ίδιου χρόνου.

Υπολογίζεται, αρχικά, ο δείκτης EEOI για κάθε ταξίδι ξεχωριστά και στη συνέχεια και η μεσοσταθμική τιμή όλων των ταξιδιών, έτσι ώστε να υπάρξει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τη λειτουργική αποδοτικότητα του πλοίου σε ετήσια βάση.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Ακολουθώς, παρουσιάζεται ο πίνακας των δεδομένων μαζί με τους υπολογισμούς των δεικτών σε κάθε ταξίδι και τον τελικό υπολογισμό της μέσης τιμής.

**Πίνακας 3.1:** Στοιχεία ταξιδιού και δείκτης EEOI για το ΠΛΟΙΟ 1

No. of trip	m cargo (tn DWT)	Distance sailed (nm)	BOG CO <sub>2</sub> emis. (tons)	HFO CO <sub>2</sub> emis. (tons)	MDO CO <sub>2</sub> emis. (tons)	MGO CO <sub>2</sub> emis. (tons)	TOTAL CO <sub>2</sub> emis. (tons)	EEOI for trip (tn CO <sub>2</sub> / (tn*nm))
1	82338.9	10367	6728.08	59.49	0	117.34	6904.91	8.08909E-06
2	82338.9	9908	5133	104.02	0	153.57	5390.59	6.60762E-06
3	82338.9	12098	8085	107.14	0	157.74	8349.88	8.38227E-06
4	82338.9	8076	5644.28	365.63	0	118.94	6128.85	9.21675E-06
5	82338.9	11141.5	4314.83	4245.24	0	109.65	8669.72	9.45053E-06
6	82338.9	9841	4986.4	2293.13	0	89.13	7368.66	9.09378E-06
7	82338.9	8290	5228.48	1557.2	0	142.35	6928.03	1.01496E-05
8	82338.9	9663	6974.23	398.33	0	134.97	7507.53	9.43583E-06
9	82338.9	12060	6642.94	1555.02	0	149.4	8347.36	8.40614E-06
10	82338.9	10661	6451	2333.31	0	120.55	8904.86	1.01443E-05

**Average EEOI**  
**(tnCO<sub>2</sub>/ (tn\*nm))**  
**8.8976E-06**

Η τελική τιμή λοιπόν του δείκτη είναι :  $EEOI_{AVERAGE} = 8.8976 \times 10^{-6} \text{ tn CO}_2 / (\text{tn} \times \text{nm})$

### **3.1.2.2 Steam propulsion LNG carrier (ΠΛΟΙΟ 2)**

Ομοίως με το πλοίο 1, είναι γνωστή η συνολική ποσότητα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε τόννους και η διανυθείσα απόσταση σε ναυτικά μίλια για κάθε ταξίδι. Το DWT του πλοίου είναι γνωστό και ίσο με 79046.2 tons. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τα 10 πιο πρόσφατα ταξίδια του πλοίου από το Φεβρουάριο του 2012 έως και το Νοέμβριο του ίδιου χρόνου, όπως ακριβώς και στο πλοίο 1.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Ο πίνακας των δεδομένων και οι υπολογισμοί παρουσιάζονται ακολούθως :

**Πίνακας 3.2:** Στοιχεία ταξιδιού και δείκτης EEOI για το ΠΛΟΙΟ 2

No. of trip	m cargo (tn DWT)	Distance sailed (nm)	BOG CO2 emis. (tons)	HFO CO2 emis. (tons)	MDO CO2 emis. (tons)	MGO CO2 emis. (tons)	TOTAL CO2 emis. (tons)	EEOI for trip (tn CO2/(tn*nm))
1	79046.2	9418	4845.58	4571.94	0	3.21	9420.73	1.26545E-05
2	79046.2	11362	4533.76	641.57	3.21	3.21	5181.75	5.76953E-06
3	79046.2	9045	6258.56	812.86	0	12.82	7084.24	9.9084E-06
4	79046.2	9460	6613.38	1588.34	0	0	8201.72	1.09681E-05
5	79046.2	9948	8122.21	174.41	0	0	8296.62	1.05508E-05
6	79046.2	9948	3296.22	11024.35	3.21	3.21	14326.99	1.82196E-05
7	79046.2	8202	6490.18	2784.27	0	76.94	9351.39	1.44237E-05
8	79046.2	103	6490.18	311.44	0	0	6801.62	0.000835399
9	79046.2	6497	3245.33	2818.53	0	131.45	6195.31	1.20634E-05
10	79046.2	10639	8063.19	230.47	0	0	8293.66	9.86199E-06

**AverageEEOI**  
**(tnCO2/(tn\*nm))**  
**9.39819E-05**

Η τελική τιμή λοιπόν του δείκτη είναι :  $EEOI_{AVERAGE} = 9.39819 \times 10^{-6} \text{ tn CO}_2 / (\text{tn} \times \text{nm})$

Συγκριτικά λοιπόν για τα δύο πλοία ισχύει:

Τύπος πλοίου	Ηλεκτροκίνητο LNG(ΠΛΟΙΟ-1)	Συμβατικό LNG(ΠΛΟΙΟ-2)
Δείκτης EEOI[tnCO <sub>2</sub> / (tn×nm)]	$8.8976 \times 10^{-6}$	$9.39819 \times 10^{-5}$



**Παρατηρούμε ότι ο δείκτης ΕΕΟΙ προκύπτει πολύ μεγαλύτερος για το πλοίο συμβατικής πρόωσης (η σύγκριση μεταξύ των δύο πλοίων είναι επιτρεπτή, καθώς πρόκειται για ίδιου σχεδόν DWT LNG πλοία). Αυτό σημαίνει ότι το πλοίο που χρησιμοποιεί ηλεκτροπρόωση είναι πολύ πιο αποδοτικό ενεργειακά σε αντιδιαστολή με το πλοίο που χρησιμοποιεί συμβατικά μέσα πρόωσης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, εφόσον είναι γνωστό ότι οι μηχανές που προορίζονται να κινούν γεννήτριες λειτουργούν σε σταθερά εύρη στροφών άρα παρουσιάζουν πολύ πιο σταθερά χαρακτηριστικά σε σχέση με αυτές που κινούν απ'ευθείας τον άξονα. Η σταθερότητα αυτή στη λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη κατανάλωση και ως εκ τούτου μειωμένη εκπομπή ρύπων.**

### **3.1.2.3 Diesel electric propulsion LNG carrier Number 2 (ΠΛΟΙΟ 3)**

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, το πλοίο 3 δεν έχει παραδοθεί ακόμα, επομένως δεν υπάρχουν στοιχεία ταξιδιού για το συγκεκριμένο πλοίο. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός του δείκτη ΕΕΟΙ γίνεται προχωρώντας σε υποθέσεις σχετικά με τα εμπλεκόμενα στο δείκτη μεγέθη. Συνεπώς, η τελική τιμή που προκύπτει αποτελεί μία υποθετική και προσεγγιστική τιμή του δείκτη η οποία δεν μένει παρά να εξακριβωθεί στο πρώτο ταξίδι που θα πραγματοποιήσει το πλοίο μετά την παραδοσή του.

Οι υποθέσεις που κάνουμε είναι οι ακόλουθες: το πλοίο κάνει ταξίδι 10000 ναυτικών μιλίων με μία μέση ταχύτητα 15.5 knots. Οι υποθέσεις αυτές έγιναν με βάση τα στοιχεία για το άλλο ηλεκτροκίνητο LNG (πλοίο 1), θεωρώντας ότι εφόσον πρόκειται για παρόμοια πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, θα έχουν και παρόμοια στοιχεία ταξιδιού. Σε ό,τι αφορά την ταχύτητα πλεύσης του πλοίου 3, υπολογίστηκε αρχικά η μέση ταχύτητα πλεύσης για το ταξίδι του Νοεμβρίου του 2012 για το πλοίο 1 με βάση τα ακόλουθα στοιχεία τα οποία δόθηκαν από την εταιρία:

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**Πίνακας 3.3:** Στοιχεία ταξιδιού (ταχύτητα πλεύσης και ώρες πλεύσης) για το ΠΛΟΙΟ 1

<b>Date</b>	<b>Speed (knots)</b>	<b>Running hours</b>
1 NOV 2012	18.3	23
2 NOV 2012	17.79	24
3 NOV 2012	17.65	23
4 NOV 2012	17.5	24
5 NOV 2012	16.39	23
6 NOV 2012	12.13	24
7 NOV 2012	11.54	24
8 NOV 2012	11.88	24
9 NOV 2012	15.08	24
10 NOV 2012	15	24
11 NOV 2012	14.33	24
12 NOV 2012	14	24
13 NOV 2012	12.33	24
14 NOV 2012	11.88	24
15 NOV 2012	13.78	23
16 NOV 2012	13.38	24
17 NOV 2012	11.88	16.5
19 NOV 2012	17.22	23
20 NOV 2012	17.5	24
21 NOV 2012	17	25
22 NOV 2012	17	24
23 NOV 2012	17	24
24 NOV 2012	17.46	24
25 NOV 2012	15.8	20.5
27 NOV 2012	17.7	23
28 NOV 2012	17.72	25
29 NOV 2012	17.17	24
30 NOV 2012	17.36	25

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Υπολογίσθηκαν αρχικά οι συνολικές ώρες του ταξιδιού προσθέτοντας τις επιμέρους ώρες της τρίτης στήλης του παραπάνω πίνακα και στη συνέχεια υπολογίσθηκε η μέση ταχύτητα πλεύσης για το σύνολο των ημερών :  $V_{AVERAGE} = 15.53 \text{ knots}$  .

Θεωρήθηκε λοιπόν ότι το πλοίο 3 θα έχει, όταν ταξιδέψει, ταχύτητα πλεύσης ίση με **15.5 knots**.

Σε ότι αφορά το DWT του πλοίου 3, αυτό δεν έχει γνωστοποιηθεί ακόμα. Αυτό που υπάρχει ως στοιχείο είναι η ολική χωρητικότητά του (capacity) σε κυβικά μέτρα η οποία θα είναι περίπου  $159800 \text{ m}^3$ . Γνωρίζοντας την ολική χωρητικότητα ( $155000 \text{ m}^3$ ) και το DWT ( $82338.9 \text{ mt}$ ) του πλοίου 1, γίνεται η προσέγγιση ότι το DWT για το πλοίο 3 θα είναι περίπου **85000 mt** .

Επιπλέον, άγνωστος παράγοντας είναι και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η μοναδική πληροφορία για αυτό το μέγεθος μπορεί να αντληθεί από τον κατασκευαστή της μηχανής ο οποίος ανακοινώνει την τιμή των εκπομπών  $\text{CO}_2$  (gr/kWh) για ποσοστά φόρτισης 100% και 75%. Θεωρώντας φόρτιση 75% , η τιμή των εκπομπών ανακοινώνεται ίση με 450 gr/kWh και στο 100% δίνεται ίση με 430 gr/kWh. Γίνεται προσέγγιση θεωρώντας ποσοστό φόρτισης περίπου 78-79% (επειδή αυτό φαίνεται να είναι το ποσοστό φόρτισης για πλεύση στην ανοιχτή θάλασσα σύμφωνα με το δοθέντα ισολογισμό της εταιρίας) και εκπομπές ρύπων **445 gr/kWh**. Πρόκειται για τη θεωρητική τιμή, ωστόσο η απουσία πραγματικής τιμής για το δεδομένο χρονικό σημείο οδηγεί στη χρήση αυτής της τιμής για τον υπολογισμό του EEOI.

Τέλος, εφόσον δεν υπάρχει κάποια πραγματική κατάσταση λειτουργίας, ώστε να είναι γνωστή η ισχύς λειτουργίας, αυτή λαμβάνεται ίση με το 78.475 % (από ισολογισμό) της μέγιστης ισχύος δηλαδή **29539 kW**.

Συμπερασματικά, όλα τα δεδομένα για το πλοίο αυτό (ΠΛΟΙΟ 3) με βάση τις αναγκαίες υποθέσεις που έγιναν είναι:

- Ειδική εκπομπή ρύπων  $\text{CO}_2 = 445 \text{ gr/kWh}$
- Ισχύς λειτουργίας = 29539 kW
- Ποσότητα εκπομπών  $\text{CO}_2$  ανά ώρα =  $445 \text{ gr/kWh} \times 29539 \text{ kW} = 13145 \text{ kg/hour}$
- Ταχύτητα αναφοράς = 15.5 knots
- **Απόσταση ταξιδιού = 10000 n.miles**

**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- Διάρκεια πλεύσης στην ανοιχτή θάλασσα =  $10000/15.5 = 645.16$  hours
- **Συνολική ποσότητα εκπομπών CO<sub>2</sub>** =  $13145 \text{ kg/hour} \times 645.16 \text{ hours}$   
= **8480.63 tons**
- **DWT = 85000 mt**

Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση  $EEOI = m_{CO_2} / (m_{CARGO} \times D)$

προκύπτει:

$$EEOI = 8480.63 \text{ tons CO}_2 / (85000 \text{ tons} \times 10000 \text{ nm}) \rightarrow$$

$$\rightarrow \boxed{EEOI = 9.9772 \times 10^{-6} \text{ tnCO}_2 / (\text{tn} \times \text{nm})}$$

Το αποτέλεσμα, παρόλο που βασίζεται σε θεωρητικές υποθέσεις και δεν αντιπροσωπεύει πραγματική κατάσταση ταξιδιού είναι κοντά στην τιμή που προέκυψε για το έταιρο ηλεκτροκίνητο LNG – ΠΛΟΙΟ 1 (  $8.8976 \times 10^{-6} \text{ tnCO}_2 / (\text{tn} \times \text{nm})$  ) για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά στοιχεία ταξιδιού. Με την παράδοση του πλοίου και την έναρξη των ταξιδιών αναμένεται η τιμή του, μελλοντικά υπολογισθέντος, δείκτη EEOI να είναι πολύ κοντά σε αυτήν την τιμή.

## **3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ EEDI**

### **3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI) για τρία πλοία. Πρόκειται για τα εξής πλοία:

*A) Ηλεκτρικής πρόωσης πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (ΠΛΟΙΟ 1).*

*B) Συμβατικής πρόωσης πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (ΠΛΟΙΟ 2).*

*Γ) Δεύτερο πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου ηλεκτρικής πρόωσης (ΠΛΟΙΟ 3-υπό κατασκευή).*

### **3.2.2 Α' ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ EEDI**

Σύμφωνα με τον IMO, ο τύπος υπολογισμού του EEDI δεν ισχύει για πλοία με ηλεκτροπρόωση, ωστόσο εμείς προχωρούμε σε κάποια προσέγγιση του υπολογισμού του δείκτη για τα ηλεκτροκίνητα πλοία. Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται ο υπολογισμός του δείκτη με βάση τις απλοποιήσεις που μπορούν να γίνουν στη σχέση υπολογισμού σε ό,τι αφορά τις μονάδες μέτρησης των μεγεθών. Οι απλοποιήσεις αυτές καταλήγουν στην πολύ πιο απλή, σε σχέση με την αρχική, έκφραση του αριθμητή της σχέσης σε gr CO<sub>2</sub>/hour. Συνεπώς, εάν είναι γνωστή η ειδική εκπομπή των ρύπων διοξειδίου του άνθρακα (gr CO<sub>2</sub>/kWh), πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη συνολική ισχύ και προκύπτει ο αριθμητής της σχέσης υπολογισμού του δείκτη EEDI. Γνωρίζοντας και τα δύο βασικά μεγέθη του παρονομαστή (DWT και V<sub>ref</sub>) υπολογίζεται τελικά ο δείκτης.

Η γενική μορφή της σχέσης που υπολογίζει το δείκτη EEDI είναι :

$$\text{(Ισχύς} \times \text{ Συντελ. μετατροπής καυσίμου-ρύπων CO}_2 \times \text{ Ειδ. κατανάλ. καυσίμου)} / \text{(DWT} \times \text{ Ταχύτητα)}$$

(3.3)

Συνεπώς οι μονάδες μέτρησης των μεγεθών που εισάγονται στον τύπο είναι :

$$\frac{\text{kW} \times (\text{gr CO}_2/\text{gr fuel}) \times (\text{gr fuel/kWh})}{\text{tons} \times \text{knots}}$$

(3.4)

δηλαδή (μετά τις απλοποιήσεις) :

$$\frac{\text{gr CO}_2 / \text{hour}}{\text{tons} \times \text{knots}}$$

(3.5)

Με γνωστό μέγεθος τα grCO<sub>2</sub>/kWh της ειδικής εκπομπής CO<sub>2</sub> και πολλαπλασιάζοντας με τα kW της συνολικής ισχύος, προκύπτει ο αριθμητής του δείκτη.

### **3.2.2.1 Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion No 1 (ΠΛΟΙΟ 1)**

Το πλοίο διαθέτει 3 ηλεκτρομηχανές 12V50DF (WARTSILA) των 11400kW η καθεμιά, 1 ηλεκτρομηχανή 6L50DF (WARTSILA) των 5700 kW και μία γεννήτρια έκτακτης ανάγκης της εταιρίας Lindenberg (μοντέλο MTU 16V 2000 P82) ισχύος 930 kW. Σύμφωνα με ένα συντελεστή απόδοσης γεννήτριας ίσο με 96.5 % (αναφέρεται στο project guide της μηχανής 50DF της Wartsila) η μέγιστη ισχύς που αποδίδουν στο σύστημα οι μεγάλες γεννήτριες είναι 11000 kW η καθεμιά και η πιο μικρή 5500 kW. Το πλοίο λοιπόν διαθέτει ηλεκτρομηχανές Wartzila 50DF. Ο κατασκευαστής της μηχανής αυτής δίδει την ειδική εκπομπή ρύπων διοξειδίου του άνθρακα ως εξής (product guide):

Typical emissions level	100% load	75% load
CO <sub>2</sub> (gr/kWh)	430	450

Σύμφωνα με τον ορισμό των μεγεθών που απαρτίζουν τον τύπο υπολογισμού του EEDI σαν ποσοστό φόρτισης χρησιμοποιείται το 75% της μέγιστης συνεχούς ισχύος (MCR). Συνεπώς, τα δεδομένα προς αξιοποίηση είναι :

- ✓ Ειδ.εκπομπή CO<sub>2</sub> = 450 gr/kWh
- ✓ Ισχύς = 75% × P<sub>MAX</sub> = 75% × (3 × 11000 + 1 × 5500) = 75% × 38500 = 28875 kW
- ✓ DWT = 82338.9 tons
- ✓ V<sub>ref</sub> = 19.5 knots

Τελικά προκύπτει:  $EEDI = (450 \times 28875) / (82338.9 \times 19.5) = 8.093 \text{ grCO}_2 / (tn \times nm)$

### **3.2.2.2 Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion LNG carrier No 2 (ΠΛΟΙΟ 3)**

Το πλοίο διαθέτει 2 ηλεκτρομηχανές 12V50DF (WARTSILA) των 11700kW η καθεμιά, 2 ηλεκτρομηχανές 8L50DF (WARTSILA) των 7800 kW η καθεμιά και μία γεννήτρια έκτακτης ανάγκης ισχύος 850 kW. Σύμφωνα με ένα συντελεστή απόδοσης γεννήτριας ίσο με 96.5 % (αναφέρεται στο project guide της μηχανής 50DF

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

της Wartsila) η μέγιστη ισχύς που αποδίδουν στο σύστημα οι μεγάλες γεννήτριες είναι 11290 kW η καθεμιά και οι πιο μικρές 7530 kW η καθεμιά.

Ομοίως με το αντίστοιχο πλοίο 1 τα δεδομένα για τον υπολογισμό είναι:

- ✓ Ειδ.εκπομπή  $CO_2 = 450 \text{ gr/kWh}$
- ✓ Ισχύς  $= 75\% \times P_{MAX} = 75\% \times (3 \times 11290 + 1 \times 7530) = 75\% \times 41400 = 31050 \text{ kW}$
- ✓ DWT = 85000 tons
- ✓  $V_{ref} = 19.5 \text{ knots}$

Τελικά προκύπτει:  $EEDI = (450 \times 31050) / (85000 \times 19.5) = 8.43 \text{ grCO}_2 / (tn \times nm)$

**Παρατήρηση: Η ταχύτητα αναφοράς η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη EEDI είναι αρκετά μεγαλύτερη από την πραγματική ταχύτητα πλεύσης που τελικά έχει στο ταξίδι το πλοίο (σε ό,τι αφορά το πλοίο 1 για το οποίο έχουμε στοιχεία ταξιδιού). Κάτι αντίστοιχο αναμένεται να ισχύει και για το πλοίο 3 όταν αυτό κυκλοφορήσει στην αγορά. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνει το γεγονός ότι ορισμένα ονομαστικά χαρακτηριστικά και εν προκειμένω η ταχύτητα αναφοράς ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνεται ο δείκτης EEDI με στόχο να βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ταχύτητα ορίστηκε στους 19.5 knots, ενώ η πραγματική ταχύτητα ταξιδιού είναι περίπου 15.5 knots.**

### **3.2.2.3 Υπολογισμός για το Steam propulsion LNG carrier (ΠΛΟΙΟ 2)**

Δεν υπήρχαν στη διάθεσή μας ονομαστικά στοιχεία για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για το συγκεκριμένο πλοίο με μηχανή Kawasaki UA-400 (MCR=39500 PS). Αναγκαστικά, λοιπόν, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ταξιδιού για την ειδική εκπομπή  $CO_2$ . Για το ταξίδι του Νοεμβρίου του 2012, η διάρκεια πλεύσης ήταν 658 ώρες και η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων  $CO_2 = 8293.66 \text{ tons}$ . Για την ισχύ λαμβάνεται το 75% της μέγιστης ισχύος ( $P_{MAX} = 39500 \text{ HP} = 29072 \text{ kW}$ ), άρα η ζητούμενη για τον υπολογισμό ισχύς είναι  $75\% \times 29072 \text{ kW} = 21804 \text{ kW}$ . Τα δεδομένα είναι:

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- ✓ Ειδ.εκπομπή CO<sub>2</sub> =  $(8293.66 \times 10^6 \text{ gr}) / (21804 \text{ kW} \times 658 \text{ hours}) = 578.1 \text{ gr/kWh}$
- ✓ Ισχύς =  $75\% \times P_{\text{MAX}} = 21804 \text{ kW}$
- ✓ DWT = 79046.2 tons
- ✓ V<sub>ref</sub> = 20.2 knots

Τελικά προκύπτει:  $EEDI = (578.1 \times 21804) / (79046.2 \times 20.2) = 7.89 \text{ grCO}_2 / (tn \times nm)$

**Παρατήρηση: Από τους παραπάνω υπολογισμούς φαίνεται ότι το συμβατικό πλοίο στη φάση του σχεδιασμού του είναι ενεργειακά πιο αποδοτικό από τα όμοια ηλεκτροκίνητα πλοία. Ο υπολογισμός του δείκτη EEDI βασίζεται σε μία σταθερή ισχύ ίση με το 75% της μέγιστης. Με αυτόν τον τρόπο, δε λαμβάνεται υπόψιν η δυνατότητα που έχουν τα πλοία ηλεκτρικής πρόωσης να επιλέγουν με πόσες και ποιες γεννήτριες θα λειτουργούν ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις πρόωσης (η δυνατότητα αυτή μπορεί να μειώσει αρκετά τη συνολική χρησιμοποιούμενη ισχύ), αφού θεωρείται ότι λειτουργούν σε μία και μοναδική σταθερή ισχύ (σαν να έχουν έναν μόνο ηλεκτροκινητήρα). Συνεπώς, το συμπέρασμα που προκύπτει από τους υπολογισμούς του δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής αποδοτικότητας για τα 2 ηλεκτροκίνητα πλοία και το πλοίο συμβατικής πρόωσης κρίνεται ανεπαρκές και άκρως αμφισβητούμενο.**

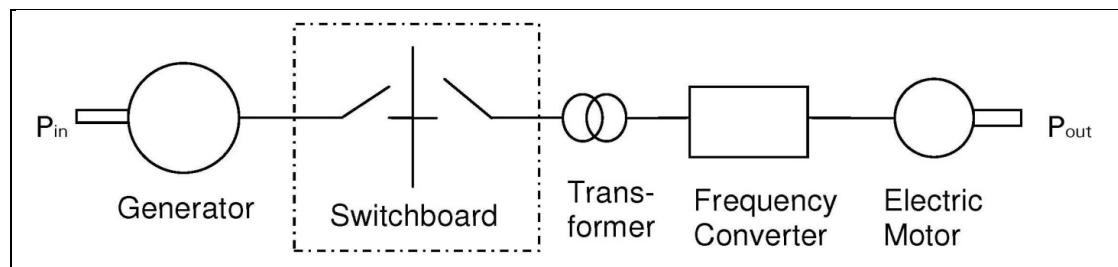


### 3.2.3 Β' ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΕΔΙ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ

Σε ό,τι αφορά τα πλοία ηλεκτρικής πρόωσης, είναι γνωστό ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία από τον IMO για τον υπολογισμό του δείκτη EEDI δεν είναι η πιο αξιόπιστη. Ο τύπος υπολογισμού βασίζεται στην εγκατεστημένη ισχύ πρόωσης, η οποία δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα για ένα πλοίο ηλεκτροπρόωσης. Οι γεννήτριες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχουν ισχύ σε μια σειρά εφαρμογών με ποικίλες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένου του κύριου κινητήρα πρόωσης. Για το λόγο αυτό, η ισχύς αυτών των γεννητριών δεν μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με την ισχύ της κύριας μηχανής που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του EEDI.

Το CMTI (Centrum Maritieme Technologie en Innovatie) έχει προτείνει μία μεθοδολογία η οποία θα χρησιμοποιεί μία «ισοδύναμη» εγκατεστημένη ισχύ για το ηλεκτροκίνητο πλοίο. Η μεθοδολογία αυτή αναπτύχθηκε με στόχο πρώτον να μην αλλάξει ο τύπος υπολογισμού του EEDI και δεύτερον να καθίσταται επιτρεπτή η άμεση σύγκριση με πλοία συμβατικής πρόωσης.

Μία τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης (χωρίς τις κινητήριες μηχανές-prime movers) φαίνεται ακολούθως:



**Σχήμα 3.1** : τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης

Πηγή: <http://www.cmti.nl/wp-content/uploads/2011/07/110706-EEDI-study-CMTI-2010-AL.pdf>

Οι κινητήριες μηχανές (prime movers), που είναι συνήθως κινητήρες ντήζελ ή αεριοστρόβιλοι, τροφοδοτούν με ισχύ τον άξονα των γεννητριών. Ο ηλεκτρικός κινητήρας ο οποίος μπορεί να είναι και ο κινητήρας πρόωσης λαμβάνει ισχύ από τις γεννήτριες μέσω του άξονα στον οποίο είναι συνδεδεμένος. Η απώλεια ισχύος στα διάφορα εξαρτήματα μεταξύ του άξονα του κινητήρα ντήζελ και του άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα συνίσταται σε μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες με

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

αποτέλεσμα την αύξηση της εκλυόμενης θερμότητας και κατά επέκταση την αύξηση της θερμοκρασίας του εξοπλισμού και του περιβάλλοντα χώρου. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος θα είναι :

$$\eta = P_{out} / P_{in} = P_{out} / (P_{out} + P_{losses}) \quad (3.6)$$

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του κάθε εξαρτήματος μπορεί να υπολογιστεί και τυπικές τιμές για πλήρη παροχή ισχύος είναι:

**Πίνακας 3.4:** Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης εξαρτημάτων σε σύστημα ηλεκτροπρόωσης

Εξάρτημα	Ηλ.β.απόδοσης
Γεννήτρια	0.95-0.97
Πίνακας διακοπής ισχύος (switchboard)	0.999
Μετασχηματιστής	0.999-0.995
Ρυθμιστής συχνότητας	0.98-0.99
Ηλεκ.κινητήρας	0.95-0.97

Από τον παραπάνω πίνακα συμπεραίνεται ότι η αποδοτικότητα ενός συστήματος ηλεκτροκίνησης από τον άξονα του κινητήρα ντήζελ έως τον άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης είναι μεταξύ 0.875 και 0.926 για πλήρες φορτίο.

**Υπολογιστική διαδικασία:**

Ο υπολογισμός διεξάγεται βασιζόμενος στη γνωστή εξίσωση υπολογισμού του δείκτη EEDI:

$$EEDI = \frac{1}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) \right. \\ \left. + \left[ \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right] \right. \\ \left. - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right) \right\} \quad (3.7)$$

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Η βασική προσέγγιση της μεθόδου είναι ο υπολογισμός του 75% της «ισοδύναμης εγκατεστημένης ισχύος που απαιτείται για να επιτευχθεί η ταχύτητα αναφοράς σε κατάσταση μέγιστης φόρτισης. Η «ισοδύναμη» εγκατεστημένη ισχύς είναι, γενικά, τμήμα της πραγματικής εγκατεστημένης ισχύος και υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{elec\ max} = \text{Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς πρόωσης}$$
$$P_{elec} = 75\% \times P_{elec\ max} \quad (3.8)$$

$f_{elec}$  = απώλειες από την ισχύ του κινητήρα ντήζελ έως την ισχύ του ηλεκτροκινητήρα

$$n = P_{out} / P_{in} = P_{out} / (P_{out} + P_{losses}) = 1/f_{elec} \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής  $f_{elec}$  λαμβάνεται ίσος με μία τιμή μεταξύ του 1.1 και του 1.2 (από βιβλιογραφία).

Η «ισοδύναμη εγκατεστημένη ισχύς της κύριας μηχανής υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{ME} = f_{elec} \times P_{elec} \quad (3.10)$$

Το  $MCR_{ME} = P_{ME} / 0.75$  (3.11)

Η βοηθητική ισχύς υπολογίζεται με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{AE} = (0,025 \times MCR) + 250, \text{ όταν } MCR \geq 10000 \text{ kW} \quad (3.12 \alpha)$$

$$P_{AE} = 0,05 MCR, \text{ όταν } MCR \leq 10000 \text{ kW} \quad (3.12 \beta)$$

Ακολουθεί η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου για τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία:

A) Diesel Electric LNG carrier Number 1 (ΠΛΟΙΟ 1)

B) Diesel Electric LNG carrier Number 2 (ΠΛΟΙΟ 3)

**3.2.3.1 Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion LNG carrier No 1 (ΠΛΟΙΟ**

**1)**

Δεδομένα:

Ship type	Diesel Electric LNG carrier
DWT	82338.9 mt
Total Diesel Engine Power	3 × 11000 + 1 × 5500
SFC	158.75 gr/kWh
Fuel Type	LNG
C <sub>f</sub>	2.75 grCO <sub>2</sub> / gr fuel
V <sub>ref</sub>	19.5 knots
F <sub>elec</sub>	1.15
Total installed E.prop.power	25300 kW

Υπολογισμός:

$$P_{elec\ max} = 25300\ kW$$

$$P_{elec} = 75\% \times P_{elec\ max} = 0.75 \times 25300 = 18975\ kW$$

$$P_{ME} = f_{elec} \times P_{elec} = 1.15 \times 18975 = 21821.25\ kW$$

$$MCR_{ME} = P_{ME} / 0.75 = 21821.25 / 0.75 = 29095\ kW$$

$$P_{AE} = (0.025 \times MCR) + 250 = (0.025 \times 29095) + 250 = 977.375\ kW$$

Άρα τελικά προκύπτει για το δείκτη:

$$EEDI = ( P_{ME} \times C_F \times SFC + P_{AE} \times C_F \times SFC ) / ( V_{ref} \times Capacity ) \rightarrow$$

$$EEDI = ( 21821.25 \times 2.75 \times 158.75 + 977.375 \times 2.75 \times 158.75 ) / ( 19.5 \times 82338.9$$

)  $\rightarrow$

$$EEDI = 6.2\ gr\ CO_2 / (tn \times nm)$$

**3.2.3.2 Υπολογισμός για το Diesel electric propulsion LNG carrier No 2 (ΠΛΟΙΟ 3)**

Δεδομένα:

Ship type	Diesel Electric LNG carrier
DWT	85000 mt
Total Diesel Engine Power	$2 \times 11290 + 2 \times 7530$
SFC	158.75 gr/kWh
Fuel Type	LNG
$C_f$	2.75 grCO <sub>2</sub> / gr fuel
$V_{ref}$	19.5 knots
$F_{elec}$	1.15
Total installed E.prop.power	25300 kW

Υπολογισμός:

$$P_{elec\ max} = 26520\ kW$$

$$P_{elec} = 75\% \times P_{elec\ max} = 0.75 \times 26520 = 19890\ kW$$

$$P_{ME} = f_{elec} \times P_{elec} = 1.15 \times 19890 = 22873.5\ kW$$

$$MCR_{ME} = P_{ME} / 0.75 = 22873.5 / 0.75 = 30498\ kW$$

$$P_{AE} = (0.025 \times MCR) + 250 = (0.025 \times 30498) + 250 = 1012.45\ kW$$

Άρα τελικά προκύπτει για το δείκτη:

$$EEDI = ( P_{ME} \times C_F \times SFC + P_{AE} \times C_F \times SFC ) / ( V_{ref} \times Capacity ) \rightarrow$$

$$EEDI = ( 22873.5 \times 2.75 \times 158.75 + 1012.45 \times 2.75 \times 158.75 ) / ( 19.5 \times 85000 )$$

→

$$\mathbf{EEDI = 6.49\ gr\ CO_2 / (tn \times nm)}$$

### **3.2.4 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΔΕΙΚΤΗ ΕΕΟΙ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ**

Ο δείκτης ΕΕΟΙ συσχετίζει την κατανάλωση καυσίμου με το ωφέλιμο μεταφορικό έργο. Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή του περιορίζεται σε καταστάσεις πλεύσης στην ανοιχτή θάλασσα (sailing modes), όπου το πλοίο διανύει ναυτικά μίλια επομένως υφίσταται η έννοια του μεταφορικού έργου (τόννοι μεταφερόμενου φορτίου \* διανυθέντα ναυτικά μίλια). Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή σε καταστάσεις εντός λιμανιού ή κοντά στο λιμάνι όπου π.χ. λαμβάνει χώρα διαχείριση φορτίου (φόρτωση εκφόρτωση) ο δείκτης δεν μπορεί να εφαρμοστεί και κρίνεται ανεπαρκής. Αυτό αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα-πρόβλημα του δείκτη καθώς οι περιοχές γύρω από τα λιμάνια είτε ήδη αποτελούν, είτε σύντομα θα αποτελέσουν ζώνες περιορισμένων εκπομπών ρύπων (Emission Control Areas – ECA's) και συνεπώς είναι επιτακτική η ανάγκη διαμόρφωσης ενός κατάλληλου δείκτη επιδοσομέτρησης για τις καταστάσεις αυτές (cargo handling mode, manoueuvering mode, idle mode).

- Για τις καταστάσεις διαχείρισης φορτίου (load handling), μία πρόταση θα μπορούσε να είναι η τροποποίηση του ορισμού του δείκτη ως ακολούθως:

$$EEOI_{Load\ handling} = \frac{\text{Παραγόμενοι ρύποι } CO_2 \text{ σε tons}}{\text{ποσότητα διαχειριζόμενου φορτίου σε tons επί τη συνολική διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης σε ώρες}}$$

(3.13)

- Για τις καταστάσεις πραγματοποίησης ελιγμών (maneuvering), μία πρόταση θα μπορούσε να είναι η τροποποίηση του ορισμού του δείκτη ως ακολούθως:

$$EEOI_{Maneuvering} = \frac{\text{Παραγόμενοι ρύποι } CO_2 \text{ σε tons}}{\text{συνολική απόσταση των ελιγμών σε μέτρα.}}$$

(3.14)

Σημείωση: Η απόσταση των ελιγμών θα μπορούσε να υπολογισθεί με άθροιση των μηκών του τόξου που διαγράφει το πλοίο κατά τους ελιγμούς.

Δεν μένει λοιπόν παρά να θεσπιστούν ειδικοί κανονισμοί σε τέτοιες καταστάσεις με βάση αναφοράς κάποιους αντίστοιχους δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας που μπορούν να εισαχθούν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται οι ποσότητες των εκπεμπόμενων ρύπων για τις διάφορες πιθανές καταστάσεις λειτουργίας και παρατίθενται τα αποτελέσματα εκπομπών για τα 3 υπό μελέτη πλοία. Για τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία (πλοίο 1 και πλοίο 3) χρησιμοποιούνται στοιχεία από μετρήσεις κάποιας δεδομένης ηλεκτρομηχανής κατά προσέγγιση ενώ για το πλοίο συμβατικής πρόωσης (πλοίο 2) χρησιμοποιούνται δεδομένα ταξιδιού για τους ρύπους CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>.

Για τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία τα δεδομένα για τους εκπεμπόμενους ρύπους που υπάρχουν είναι σε μονάδες τέτοιες ώστε να μην είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα επιτρεπτά όρια των διεθνών κανονισμών. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μία συγκεκριμένη μεθοδολογία για τη μετατροπή των μεγεθών στις κατάλληλες μονάδες.

Κατόπιν, τα αποτελέσματα εκπομπών ρύπων συγκρίνονται με τα όρια των κανονισμών σε κοινά γραφήματα. Τονίζεται ότι η μελέτη των εκπεμπόμενων ρύπων έγινε όχι μόνο για καταστάσεις πλεύσης στην ανοιχτή θάλασσα αλλά και για καταστάσεις πλεύσης ή πραγματοποίησης ελιγμών μέσα στο λιμάνι. Το γεγονός αυτό κρίνεται πολύ σημαντικό λόγω της συνεχούς εξέλιξης και αυστηροποίησης των κανονισμών ειδικά κοντά σε ακτές και σε λιμάνια. Υπογραμμίζεται σε αυτό το σημείο η αυστηρότητα των κανονισμών στις λεγόμενες περιοχές ECA (Emission Controlled areas). Επιπλέον, γίνεται αναφορά στο ποσοστό φόρτισης των γεννητριών και κατά πόσον αυτό δύναται να βελτιωθεί με στόχο την ομαλότερη λειτουργία τους και την εξασφάλιση μεγαλύτερης αποδοτικότητας.

### 4.2 Προσδιορισμός παραγόμενων ρύπων για τα ηλεκτροκίνητα πλοία

Από την πηγή [Διπλωματική εργασία Παναγιώτη Μπουσούνη], είναι διαθέσιμες μετρήσεις εκπομπών ρύπων για την ηλεκτρομηχανή L16-24 της MAN. Πρόκειται για μία μικρή ηλεκτρομηχανή, αρκετά μικρότερης ισχύος από αυτές που διαθέτει το πλοίο που χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς-μελέτης για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης. Ωστόσο, οι μετρήσεις αυτές μπορούν κατ'εκτίμηση να χρησιμοποιηθούν για το ηλεκτροκίνητο πλοίο - σημείο αναφοράς μας με μια παρατήρηση: οι τιμές αυτές εξασφαλίζουν ότι βρισκόμαστε στην ασφαλή πλευρά, καθώς πρόκειται για τιμές εκπομπών από μία πιο μικρή ηλεκτρομηχανή, επομένως

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώωση**

πιο αυξημένες από τις τελικές τιμές για το υπό μελέτη πλοίο το οποίο διαθέτει μεγαλύτερες ηλεκτρομηχανές. Συνεπώς, μπορεί να ειπωθεί ότι οι εκτιμήσεις για όλους τους ρύπους είναι πιο απαισιόδοξες. Οι διαθέσιμες μετρήσεις αφορούν 5 διαφορετικά σημεία λειτουργίας, 10%, 25%, 50%, 75% και 90% ποσοστό φόρτισης γεννητριών. Μπορούμε λοιπόν να έχουμε εκτίμηση ρύπων σε όλο το φάσμα φόρτισης 0-100% της κάθε μηχανής. Η παρεμβολή για κάθε σημείο λειτουργίας έγινε με το πρόγραμμα curve\_expert. Χρησιμοποιείται αυτή η οποία βγάζει το μικρότερο σφάλμα στα σημεία μέτρησης (residuals). Οι μετρήσεις στις οποίες έγινε η παρεμβολή Lagrange παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 4.1:** Τιμές εκπεμπόμενων ρύπων για διάφορα ποσοστά φόρτισης

loading (%)	loading (p.u.)	NOx (ppm)	C3H8 (ppm)	CO (ppm)	CO (%vol)	CO2(%vol)
10	0.1	540	50	200	0.02	4.1
25	0.25	870	67	100	0.012	5.07
50	0.5	1100	62	56	0.007	5.78
75	0.75	1110	61	67	0.0078	5.87
90	0.9	1110	60	72	0.008	5.95

Ακολούθως φαίνονται οι ρύποι ανηγμένοι ως προς το σημείο λειτουργίας :

**Πίνακας 4.2:** Τιμές εκπεμπόμενων ρύπων ανηγμένες ως προς το ποσοστό λειτουργίας

loading (%)	loading (p.u.)	NOx (ppm) /loading(%)	C3H8 (ppm) /loading(%)	CO (ppm) /loading(%)	CO (%vol) /loading(%)	CO2(%vol) /loading(%)
10	0.1	54.00	5.00	20.00	0.0020	0.41
25	0.25	34.80	2.68	4.00	0.0005	0.20
50	0.5	22.00	1.24	1.12	0.0001	0.12
75	0.75	14.80	0.81	0.89	0.0001	0.08
90	0.9	12.33	0.67	0.80	0.0001	0.07

Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η φόρτιση της μηχανής τόσο μειώνεται αναλογικά (ρύποι ανά 1% ποσοστό φόρτισης) η εκπομπή ρύπων.



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Οι παραπάνω μετρήσεις είναι κάπως απαισιόδοξες, όπως ήδη αναφέρθηκε, επειδή αφορούν σε πολύ μικρότερη μηχανή από αυτές που τα υπό μελέτη πλοία διαθέτουν. Επιπλέον, οι μετρήσεις αυτές αφορούν τη λειτουργία της μηχανής με καύσιμο fuel oil. Για την κατάσταση BOG (boil off gas) εκεί δηλαδή όπου οι μηχανές καίνε φυσικό αέριο οι εκπομπές θα είναι σημαντικά μειωμένες. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> μειώνονται κατά 20% και οι εκπομπές NO<sub>x</sub> κατά 80%. Οι υπόλοιπες εκπομπές μηδενίζονται.

Σύμφωνα λοιπόν με τα ανωτέρω, παρουσιάζονται ακολούθως οι εκπομπές ρύπων για τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας για τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία :

1. Diesel Electric LNG carrier Number 1 (πλοίο 1)
2. Diesel Electric LNG carrier Number 2 (πλοίο 3)

**4.2.1 Προσδιορισμός παραγόμενων ρύπων για το πλοίο 1**

Το πλοίο διαθέτει 3 ηλεκτρομηχανές 12V50DF (WARTSILA) των 11400kW η καθεμιά, 1 ηλεκτρομηχανή 6L50DF (WARTSILA) των 5700 kW και μία γεννήτρια έκτακτης ανάγκης της εταιρίας Lindenberg (μοντέλο MTU 16V 2000 P82) ισχύος 930 kW. Σύμφωνα με τον ονομαστικό συντελεστή απόδοσης γεννήτριας που είναι ίσος με 96.5% (αναφέρεται στο project guide της μηχανής 50DF της Wartsila), η μέγιστη ισχύς που αποδίδουν στο σύστημα οι μεγάλες γεννήτριες είναι 11000 kW η καθεμιά και η πιο μικρή 5500 kW.

**A) BOG burning mode**

*Πίνακας 4.3: Ποσοστά φόρτισης και τιμές ρύπων για την κατάσταση boil off gas burning(πλοίο 1)*

		Sea going	Maneuvering with Bow Thruster	Cargo Unloading	Cargo Loading	Port Idling
El.load (kW)		29412	17772.6	6534.9	3681.7	1759.2
Generators in service	11000 kW	3	2	1		
	5500 kW				1	1

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώση**

Total power in service (kW)		33000	22000	11000	5500	5500
Gen.load factor		89.1%	80.8%	59.4%	70.6%	32.0%
CO2 (% Vol)		4.752	4.704	4.68	4.696	4.296
CO (% Vol)		-	-	-	-	-
CO (ppm)		-	-	-	-	-
NOx (ppm)		222	222	224	222	193.8
C3H8 (ppm)		0	0	0	0	0

**B) FO burning mode**

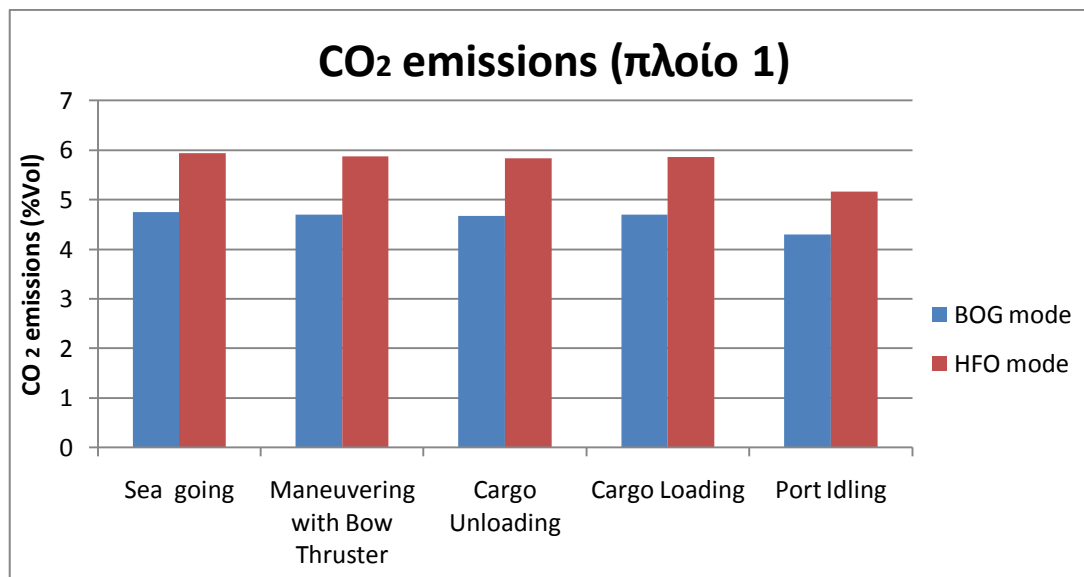
*Πίνακας 4.4: Ποσοστά φόρτισης και τιμές ρύπων για την κατάσταση fuel oil burning(πλοίο 1)*

		Sea going	Maneuvering with Bow Thruster	Cargo Unloading	Cargo Loading	Port Idling
El.load (kW)		29271.0	17777.6	6252.4	3599.2	1476.7
Generators in service	11000 kW	3	2	1		
	5500 kW				1	1
Total power in service (kW)		33000	22000	11000	5500	5500
Gen.load factor		88.7%	80.8%	56.8%	65.4%	26.8%
CO2 (% Vol)		5.94	5.88	5.84	5.86	5.16
CO (% Vol)		0.00806	0.00806	0.00692	0.00724	0.0113

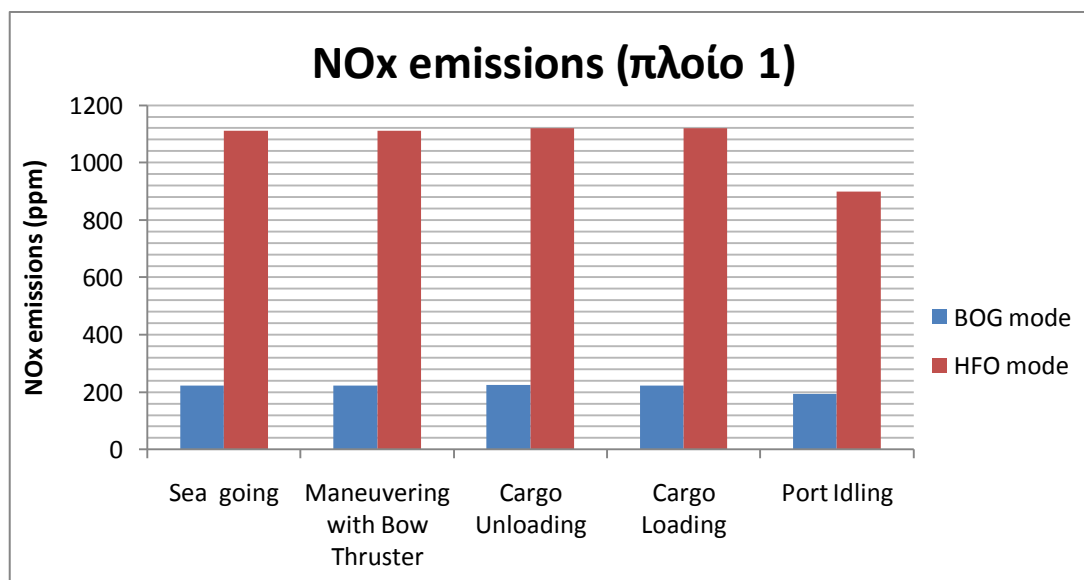
**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

CO (ppm)		71.8	69.7	57.2	61.5	92.8
NOx (ppm)		1110	1110	1120	1120	899
C3H8 (ppm)		60.5	61.5	60.6	60.1	67.4

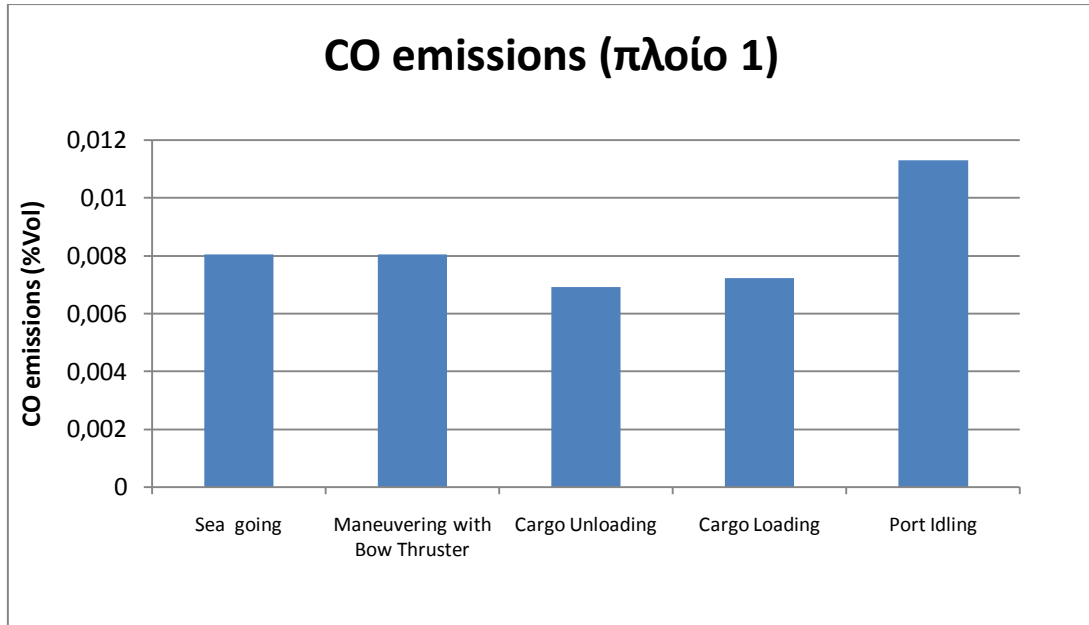
Τα αντίστοιχα ραβδογράμματα φαίνονται στα σχήματα 4.1-4.5 που ακολουθούν:



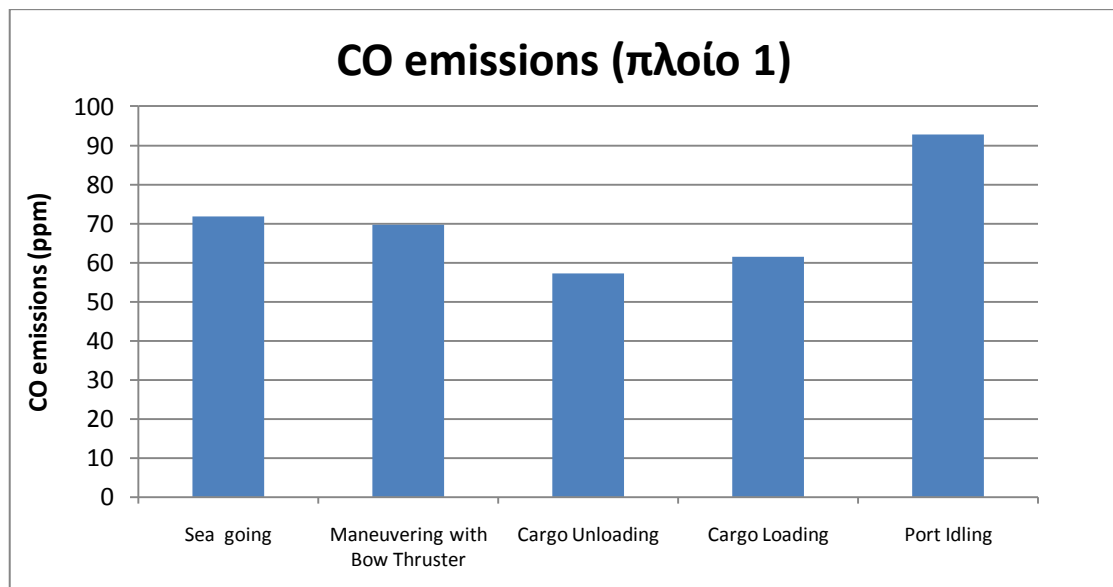
*Σχήμα 4.1: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για το πλοίο 1*



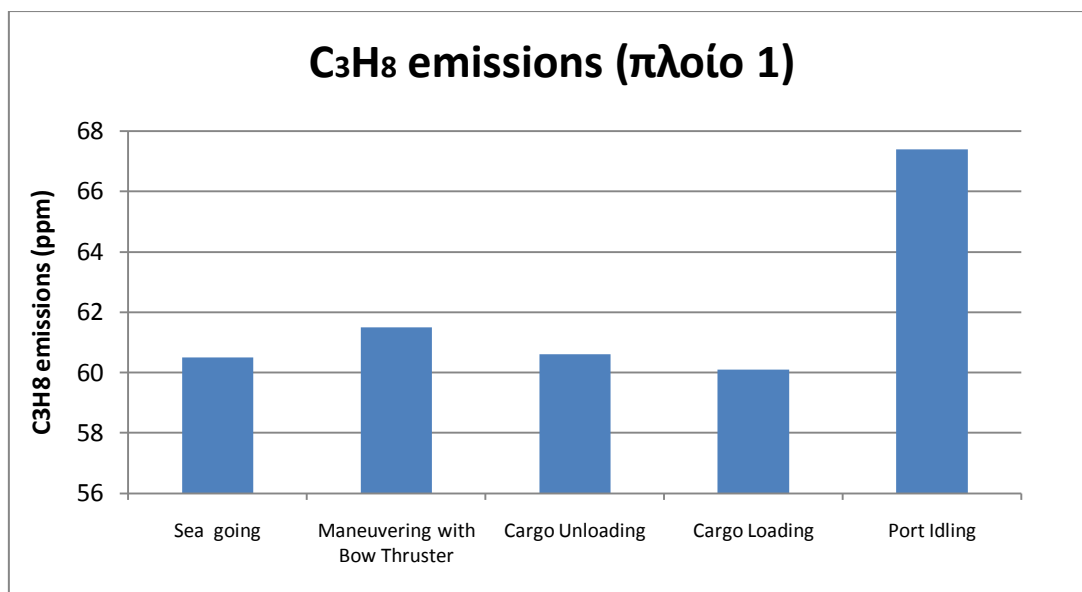
*Σχήμα 4.2: Εκπομπές NO<sub>x</sub> για το πλοίο 1*



Σχήμα 4.3: Εκπομπές CO για το πλοίο 1 (HFO mode)



Σχήμα 4.4: Εκπομπές CO για το πλοίο 1 (HFO mode)



Σχήμα 4.5: Εκπομπές C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> για το πλοίο 1 (HFO mode)



Εικόνα 4.6: Το πλοίο 1 στο Kawasaki της Ιαπωνίας (14-06-2012)

Πηγή: <http://www.marinetraffic.com>

#### **4.2.2 Προσδιορισμός παραγόμενων ρύπων για το πλοίο 3**

Το πλοίο διαθέτει 2 ηλεκτρομηχανές 12V50DF (WARTSILA) των 11700kW η καθεμιά, 2 ηλεκτρομηχανές 8L50DF (WARTSILA) των 7800 kW η καθεμιά και μία γεννήτρια έκτακτης ανάγκης ισχύος 850 kW. Σύμφωνα με ένα συντελεστή απόδοσης γεννήτριας ίσο με 96.5 % (αναφέρεται στο project guide της μηχανής 50DF της Wartsila) η μέγιστη ισχύς που αποδίδουν στο σύστημα οι μεγάλες γεννήτριες είναι 11290 kW η καθεμιά και οι πιο μικρές 7530 kW η καθεμιά.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Οι ενεργειακές ανάγκες όπως αυτές προέκυψαν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό φαίνονται ακολούθως :

	Sea full ahead	Sea full ahead	Sea full ahead	HFO mode	At port in/out	Port discharging	Port loading	Port Idle
<b>SINOLA</b>								
<b>:</b>	<b>29538.93</b>	<b>29493.12</b>	<b>28679.59</b>	<b>10630.01</b>	<b>7704.756</b>	<b>5226.928</b>	<b>1410.773</b>	

At fire	At blackout
<b>271.741</b>	<b>720.03</b>

Στη συνέχεια προσδιορίζεται το ποσοστό φόρτισης των γεννητριών για κάθε κατάσταση.

- Στην κατάσταση πρόωσης **sea full ahead Gas mode** θέλουμε 29538.93 kW. Με 4 γεννήτριες σε λειτουργία έχουμε μέγιστη παραγωγή ισχύος ίση με  $2 \times 11290 + 2 \times 7530 = 37640$  kW. Συνεπώς, για να καλύπτονται τα 29538.93 kW που απαιτούμε οι 4 γεννήτριες θα λειτουργούν σε ποσοστό  $( 29538.93 / 37640 ) * 100\% = 78.475 \%$  .

Ομοίως για τις άλλες δύο καταστάσεις sea full ahead προκύπτει το αντίστοιχο ποσοστό :

- **Sea full ahead combine :** 78.356%
- **Sea full ahead HFO mode:** 76.194%

Η διαφορά στο ποσοστό φόρτισης των γεννητριών μεταξύ των τριών καταστάσεων sea full ahead οφείλεται στο γεγονός ότι ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο αλλάζει ο αριθμός συγκεκριμένων μηχανημάτων που βρίσκονται σε λειτουργία, επομένως μεταβάλλονται οι συνολικές απαιτήσεις ισχύος.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Για τα υπόλοιπα σενάρια λειτουργίας έχουμε :

- **At port in/out :** Έχουμε δύο γεννήτριες σε λειτουργία (για λόγους ασφαλείας κατά το maneuvering) δηλαδή ,  $1 \times 11290 \text{ kW} + 1 \times 7530 \text{ kW} = 18820 \text{ kW}$ . Άρα το ποσοστό φόρτισης είναι 56.483%.
- **Port discharging:** Ομοίως για το ποσοστό φόρτισης των 2 γεννητριών : 40.939%.
- **Port loading:** Έχουμε μία γεννήτρια σε χρήση δηλαδή ,  $1 \times 7530 \text{ kW}$ . Άρα το ποσοστό φόρτισής της είναι 69.415%.
- **Idle:** Έχουμε  $1 \times 7530 \text{ kW}$  άρα το ποσοστό φόρτισής της είναι 18.735%.

Για τα δύο σενάρια έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιείται η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης (850 kW) οπότε το ποσοστό φόρτισης της γεννήτριας αυτής είναι :

- **At fire :** 31.97%
- **At blackout :** 84.709%

Συνοπτικά, τα ποσοστά φόρτισης των γεννητριών είναι:

- **sea full ahead Gas mode :** 78.475%
- **Sea full ahead combine :** 78.356%
- **Sea full ahead HFO mode:** 76.194%
- **At port in/out :** 56.483%
- **Port discharging:** 40.939%
- **Port loading:** 69.415%
- **Idle:** 18.735%

**Σγόλια-Παρατηρήσεις για τον ηλεκτρικό ισολογισμό**

Πρόωση σε πλεύση: 29.54 MW (26.8 MW χρειάζεται μόνο ο κινητήρας ηλεκτρικής πρόωσης και τα υπόλοιπα είναι τα διάφορα βοηθητικά μηχανήματα)

Κατάσταση idle (αγκυροβόλιο): 1.41 MW

Φορτοεκφόρτωση: 7.7 MW (4.4 MW καταναλώνει η αντλία εκφόρτωσης)

Μπαίνοντας και βγαίνοντας απ' το λιμάνι : 10.6 MW (2 MW το bow thruster και 4.9 MW ο κινητήρας ηλεκτρικής πρόωσης)

Κατάσταση πυρκαγιάς: 0.27 MW

Κατάσταση ολικής διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος: 0.72 MW

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Η διαφορά των 6.3 MW από την κατάσταση idle (το πλοίο είναι σε αγκυροβόλιο και λειτουργούν πολύ βασικά μόνο μηχανήματα για την “επιβίωση” πλοίου και πληρώματος) έως την κατάσταση φορτοεκφόρτωσης οφείλεται στη λειτουργία των αντλιών που λαμβάνουν δράση κατά τη φορτοεκφόρτωση με βασικότερη την main cargo pump (4.4 MW).

Σε κατάσταση πυρκαγιάς ή ολικής διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι πολύ μικρότερες (κάτι που εξηγείται εφόσον πρόκειται για απαιτήσεις έκτακτης ανάγκης).

**Πίνακας 4.5:** Ποσοστά φόρτισης και τιμές ρύπων (πλοίο 3)

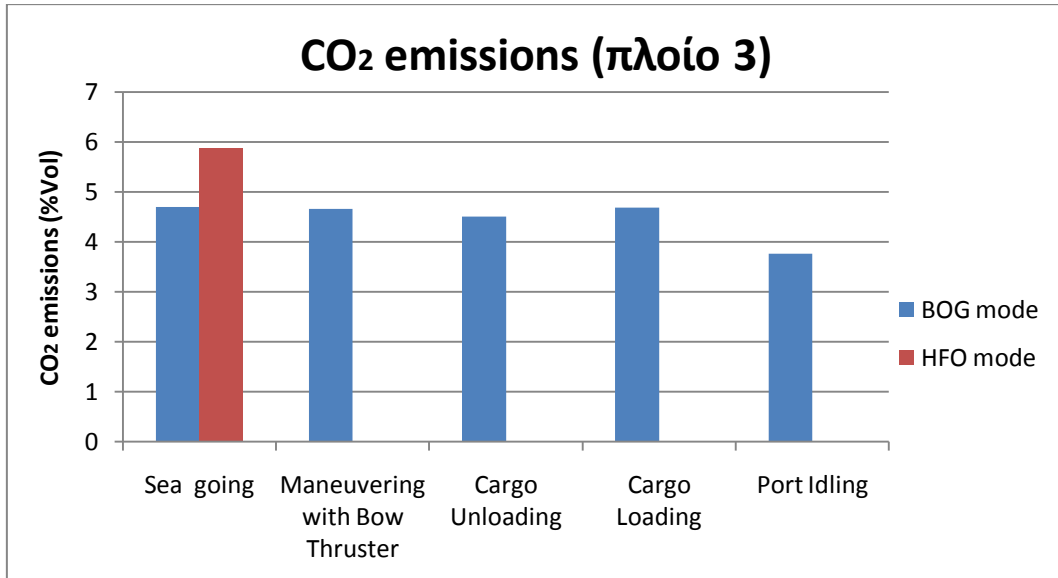
		Sea full ahead gas mode	Sea full ahead HFO mode	At port in/out	Port discharging	Port loading	Idle mode
El.load (kW)		29538.93	28679.59	10630.01	7704.756	5226.928	1410.773
Generators in service	11290 kW	2	2	1	1		
	7530 kW	2	2	1	1	1	1
Total power in service (kW)		37640	37640	18820	18820	7530	7530
Gen.load factor		78.475%	76.194%	56.483%	40.939%	69.415%	18.735%
CO <sub>2</sub> (% Vol)		4.704	5.87	4.664	4.504	4.696	3.776
CO (% Vol)		-	0.00786	-	-	-	-
CO (ppm)		-	67.6	-	-	-	-
NO <sub>x</sub> (ppm)		222	1110	222	210	222	150.6
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (ppm)		0	61.1	0	0	0	0



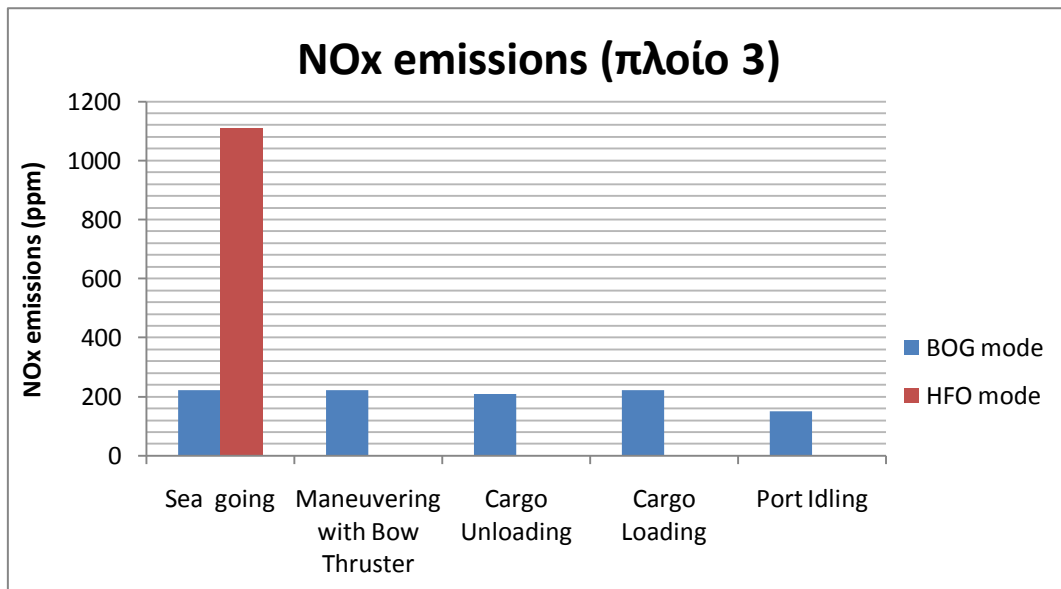
**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Στα παραπάνω αποτελέσματα εκπομπών ρύπων θεωρήθηκε ότι στις καταστάσεις *At port in/out, Port discharging, Port loading και Iddle mode* οι μηχανές καταναλώνουν *gas oil (φυσικό αέριο)*.

Τα αντίστοιχα ραβδογράμματα φαίνονται στα σχήματα 4.7-4.11 που ακολουθούν:

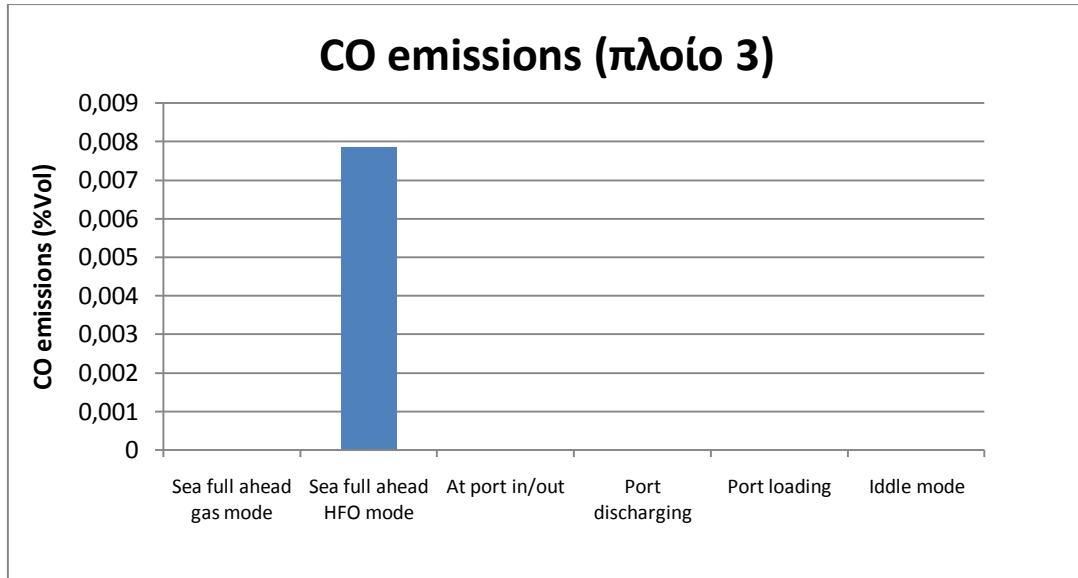


**Σχήμα 4.7:** Εκπομπές CO<sub>2</sub> για το πλοίο 3

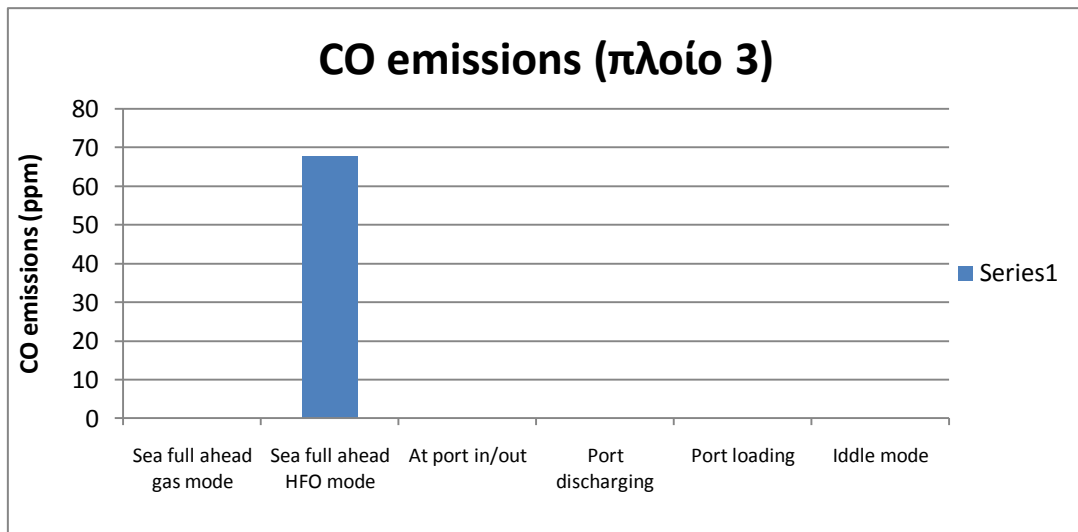


**Σχήμα 4.8:** Εκπομπές NO<sub>x</sub> για το πλοίο 3

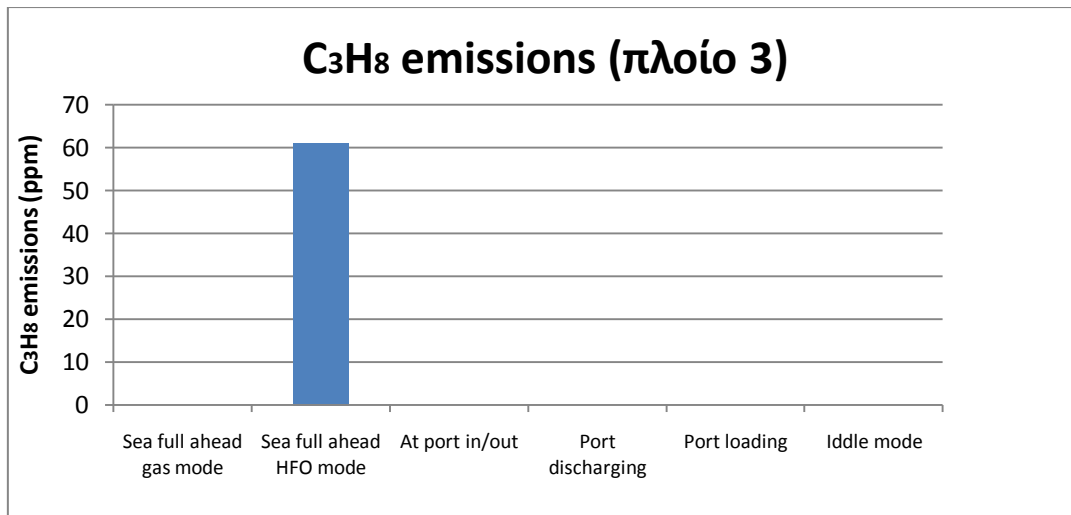
Θεόδωρος Κουτσούρης  
Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση



Σχήμα 4.9: Εκπομπές CO για το πλοίο 3 (HFO mode)



Σχήμα 4.10: Εκπομπές CO για το πλοίο 3 (HFO mode)



**Σχήμα 4.11:** Εκπομπές C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> για το πλοίο 3 (HFO mode)

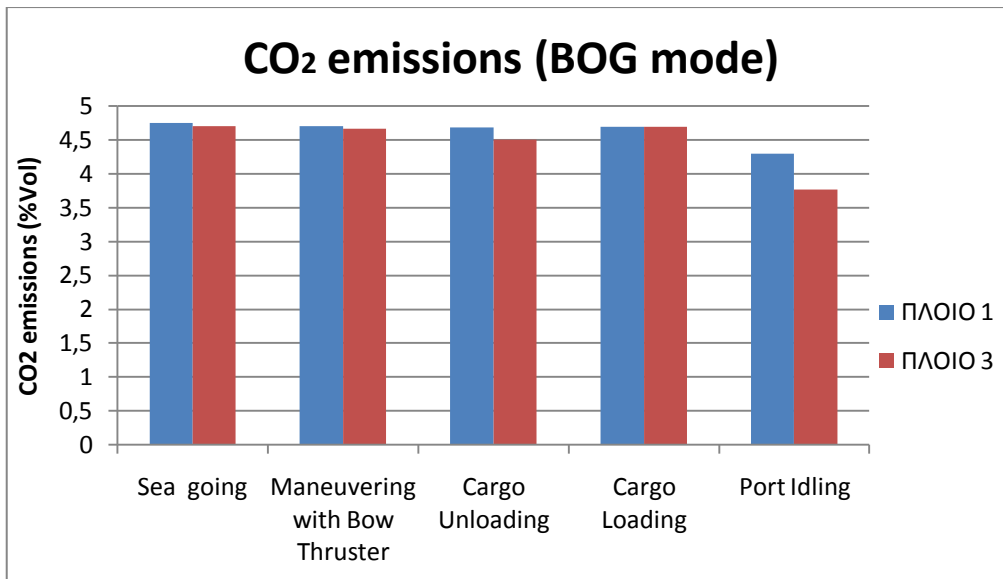
Συγκριτικά για τα δύο πλοία τα στοιχεία εκπομπών ρύπων συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

**Πίνακας 4.6:** Τιμές εκπομπών ρύπων για τα πλοία 1 και 3

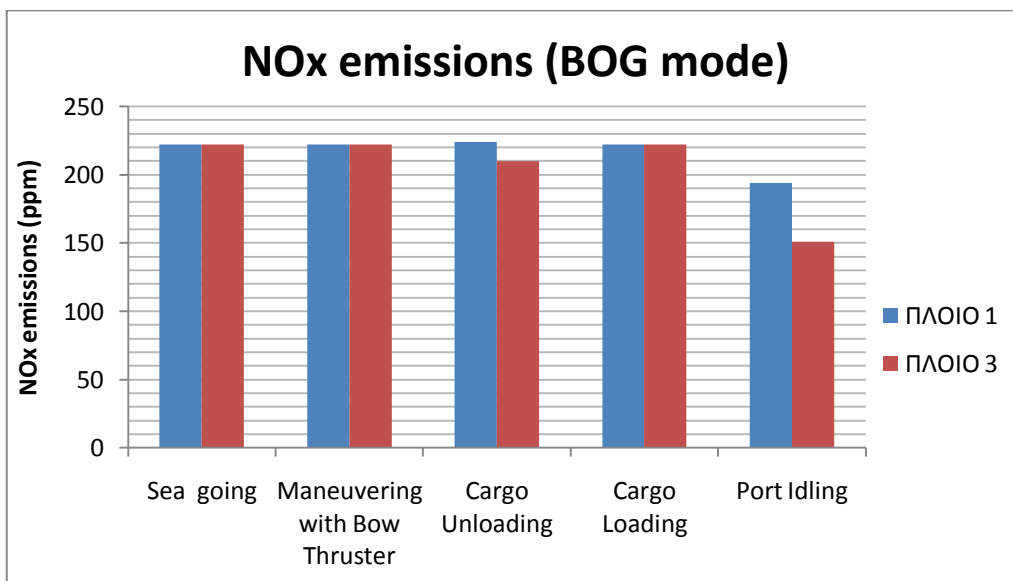
**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Κατάστασις		Diesel electric LNG carrier number 1(ΠΛΟΙΟ 1)					Diesel electric LNG carrier(ΠΛΟΙΟ 3)				
		CO <sub>2</sub> (% Vol)	CO (% Vol)	CO (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (% Vol)	CO (% Vol)	CO (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (ppm)
Boil off gas burning mode	Sea going	4.752	-	-	222	-	4.704	-	-	222	-
	Maneuvering with bow thruster - At port in/out	4.704	-	-	222	-	4.664	-	-	222	-
	Cargo unloading	4.68	-	-	224	-	4.504	-	-	210	-
	Cargo loading	4.696	-	-	222	-	4.696	-	-	222	-
	Idle mode	4.296	-	-	193.8	-	3.77	-	-	150.6	-
Fuel Oil burning mode	Sea going	5.94	0.00806	71.8	1110	60.5	5.87	0.00786	67.6	1110	61.1
	Maneuvering with bow thruster – At port in/out	5.88	0.00806	69.7	1110	61.5					
	Cargo unloading	5.84	0.00692	57.2	1120	60.6					
	Cargo loading	5.86	0.00724	61.5	1120	60.1					
	Idle mode	5.16	0.0113	92.8	899	67.4					

Θεόδωρος Κουτσούρης  
Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση

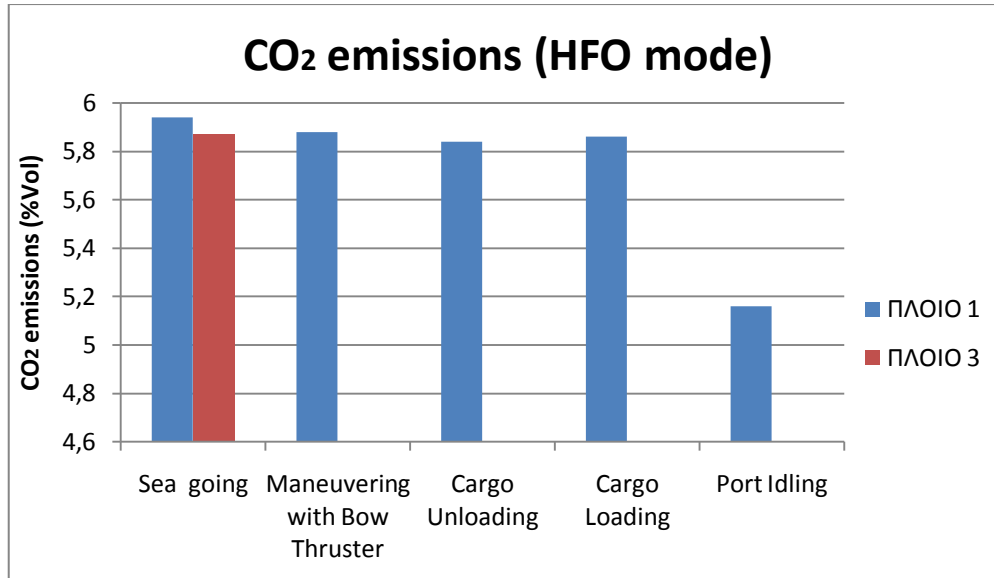


Σχήμα 4.11: Εκπομπές CO για τα πλοία 1 και 3 (BOG mode)

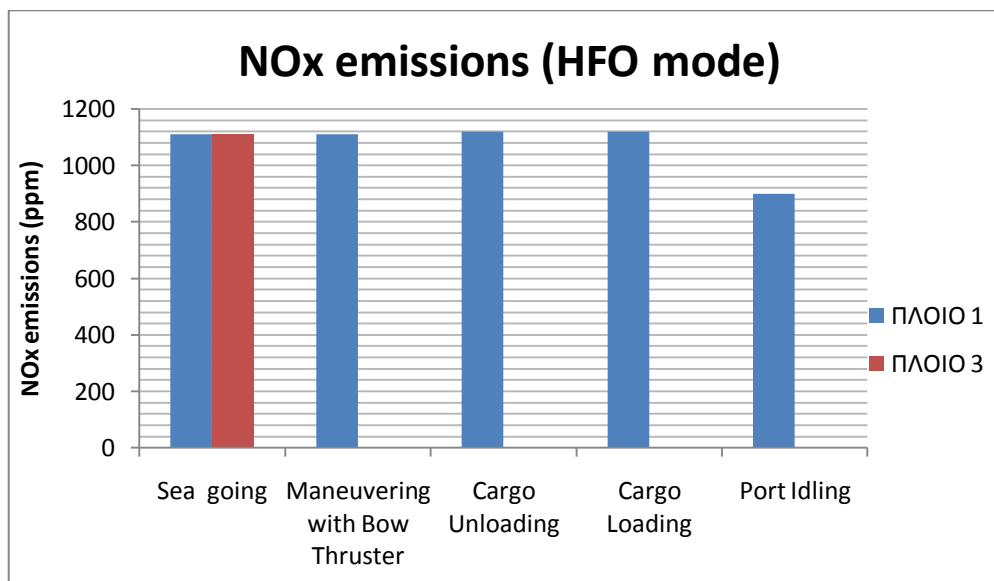


Σχήμα 4.12: Εκπομπές NOx για τα πλοία 1 και 3 (BOG mode)

Θεόδωρος Κουτσούρης  
Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση



Σχήμα 4.13: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για τα πλοία 1 και 3 (HFO mode)



Σχήμα 4.14: Εκπομπές NO<sub>x</sub> για τα πλοία 1 και 3 (HFO mode)

### **4.3 Μετατροπή μεγεθών ρύπων για τα ηλεκτροκίνητα πλοία (ΠΛΟΙΑ 1 και 3) σε μονάδες των διεθνών κανονισμών.**

#### **4.3.1 Εισαγωγή**

Σε ό,τι αφορά τους διεθνείς κανονισμούς, αυτοί παραθέτουν ανώτατα όρια για τις εκπομπές NO<sub>x</sub> σε gr/kWh, ενώ ο EEDI περιλαμβάνει την ποσότητα των εκπομπών CO<sub>2</sub> σε gr/kWh. Τα δεδομένα των εκπομπών που προέκυψαν για τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία ήταν σε μονάδες ppm (parts per million) οι εκπομπές NO<sub>x</sub> και μονάδες %Vol οι εκπομπές CO<sub>2</sub>. Η μετατροπή πραγματοποιείται με τη χρήση συγκεκριμένης μεθοδολογίας η οποία περιγράφεται στο παρακάτω υποκεφάλαιο. Αρχικά, ορίζονται κάποιες βασικές θεωρητικές στοιχειομετρικές έννοιες και στη συνέχεια ακολουθεί ένα αριθμητικό παράδειγμα σαν εφαρμογή για τις κατάλληλες μετατροπές των μονάδων των μεγεθών. Η μεθοδολογία προγραμματίστηκε σε Microsoft Excel και εφαρμόστηκε για όλες τις δεδομένες τιμές εκπεμπόμενων ρύπων. Οι μεταβλητές οι οποίες κάθε φορά εισάγονταν από το χρήστη είναι:

- Ο αριθμός στροφών λειτουργίας της μηχανής(η) σε RPM.
- Η συνολική κατανάλωση ενέργειας (BSEC) σε kJ/kWh εάν πρόκειται για gas mode κατάσταση ή η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) σε gr/kWh εάν πρόκειται για diesel mode κατάσταση. \*\*\*
- Η δεδομένη ποσότητα εκπομπών NO<sub>x</sub> σε ppm και εκπομπών CO<sub>2</sub> σε %Vol.

\*\*\* Σημείωση:

Ο κατασκευαστής της μηχανής των δύο πλοίων (Wärtsila 50DF) δίνει μέσω του product guide της μηχανής στοιχεία σχετικά με τις τιμές των μεγεθών BSEC (για Gas mode) και SFOC (για Diesel mode) για 3 ποσοστά φόρτισης 100%,75% και 50%. Ωστόσο, τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία λειτουργούν στις διάφορες καταστάσεις με ποσοστά φόρτισης μεταξύ αυτών των τιμών ή ακόμα και χαμηλότερα από 50%. Για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης σε αυτές τις ενδιάμεσες τιμές γίνεται παρεμβολή (quadratic fit) στις 3 δεδομένες τιμές. Η παρεμβολή χρησιμοποιείται και για τις τιμές εκτός του πεδίου ορισμού της συνάρτησης παρεμβολής (ποσοστά φόρτισης < 50%) με κάποια σχετική επιφύλαξη.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**Πίνακας 4.7:** Ειδική κατανάλωση ενέργειας/καυσίμου (product guide Wärtsila 50DF)

Ποσοστό φόρτισης :		100%	75%	50%
BSEC για diesel electric LNG BOIL OFF (50DF)-kJ/kWh		7300	7620	8260
BSEC για συμβατικό LNG BOIL OFF(50DF)- kJ/kWh		7300	7490	7830
SFOC για diesel electric LNG DIESEL MODE (50DF)-gr/kWh		189	192	204
SFOC για συμβατικό LNG DIESEL MODE(50DF)-gr/kWh		190	196	200

Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας μέσω συγκεκριμένης εφαρμογής με δεδομένα: τη λειτουργία σε ποσοστό φόρτισης 100%, την συνολική κατανάλωση ενέργειας ίση με 7300 kJ/kWh, εκπομπές NO<sub>x</sub> ίσες με 222 ppm και εκπομπές CO<sub>2</sub> ίσες με 4.752 %Vol.

#### **4.3.2 Μεθοδολογία μετατροπής των μονάδων ppm και %Vol σε gr/kWh**

##### **ΜΕΚ-Ειδική εκπομπή ρύπων**

Δεδομένα:

- Μηχανή:

Ισχύς: P(kW)

Στροφές: n (RPM)

Αρχή λειτουργίας: κ=2, Δίχρονη

κ=4, Τετράχρονη

Κατανάλωση καυσίμου: m<sub>f</sub> (gr)

Κατανάλωση αέρα: m<sub>a</sub> (gr)

Ανάλυση καυσαερίων: Προϊόν i ( n<sub>i</sub> - mole ή X<sub>i</sub> - ppm ή m<sub>i</sub> – gr )



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρώση**

- Ορισμοί:

Ποσοστό μάζας συστατικού i (περιεκτικότητα μάζας):

$$\xi_i = m_i / m_{tot} \quad (4.1)$$

Ποσοστό moles συστατικού i (γραμμομοριακή περιεκτικότητα):

$$X_i = n_i / n_{tot} \quad (4.2)$$

$\alpha$  ppm =  $\alpha \times 10^{-6} = X_i$  (αδιάστατο μέγεθος)

$\beta$  %Vol =  $\beta \times 10^{-2} = X_i$  (αδιάστατο μέγεθος)

$$m_{tot} = m_f + m_a \quad (4.3)$$

$$n_i = m_i / MW_i \quad (4.4)$$

( $MW_i$  είναι το μοριακό βάρος του στοιχείου i)

- Επίλυση:

Μέσω της σχέσης (4.1) έχουμε:

$$\xi_i = \frac{X_i \times MW_i}{\sum X_i \times MW_i} \quad X_i = (\alpha \text{ ppm})_i = (\alpha \times 10^{-6})_i$$

Τελικά έχουμε:  $m_i = \xi_i \times m_{tot}$

Για εκπομπές οξειδίων του αζώτου  $NO_x$  έχουμε:

$$m_{NO_x} = (\xi_{NO} + \xi_{NO_2}) \times m_{tot}$$

$$\text{Ειδική εκπομπή } NO_x = \frac{m_{NO_x} \times n \times 3600}{P \times 30 \times k} \text{ σε gr/kWh}$$

Μονάδες:  $[m_{NO_x}] = \text{gr}$

$$[P] = \text{kW}$$

$$[n] = \text{RPM}$$

**Ακολουθεί αριθμητικό παράδειγμα-εφαρμογή όλων των παραπάνω.**

Έστω 4-T 50 DF(prime mover) Wartsila

Δεδομένα :

$P = 11400 \text{ kW}$  (100% φορτίο)

$n = 500 \text{ RPM}$

$k = 4$

**A. Προσδιορισμός κατανάλωσης καυσίμου (προσέγγιση)**

Από το εγχειρίδιο της μηχανής έχουμε:

Καθαρή Ειδική Κατανάλωση Ενέργειας (Brake Specific Energy Consumption):

$$\text{BSEC} = 7150 \text{ Kj/kWh}$$

Έστω χρήση φυσικού αερίου (μεθάνιο) με θερμογόνο δύναμη

$$\Theta_u = 48000 \text{ Kj/Kg}$$

Η ειδική κατανάλωση υπολογίζεται ως:

$$b_e = \frac{\text{BSEC}}{\Theta_u} = \frac{7300 \text{ kJ/kWh}}{48000 \text{ kJ/kg}} = 152.08 \text{ gr/kWh}$$

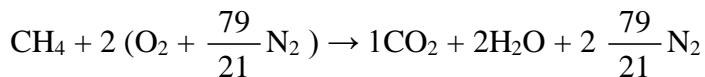
$$\text{Συνεπώς: } m_f = \frac{b_e \times P \times 30 \times k}{n \times 3600} = \frac{152.08 \times 11400 \times 30 \times 4}{500 \times 3600} = 115.58 \text{ gr}$$

**B. Προσδιορισμός κατανάλωσης αέρα (προσέγγιση)**

Η συγκεκριμένη μηχανή λειτουργεί με λόγο ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου  $\lambda = 2.1$

$$\text{Από τον ορισμό του λόγου αυτού έχουμε: } \lambda = \frac{n_{\text{O}_2} / n_f}{(n_{\text{O}_2} / n_f)_{\text{stoich}}} \quad (\alpha)$$

Συνεπώς, λαμβάνοντας προσεγγιστικά υπόψιν ότι στην εξίσωση της καύσης συμμετέχει μόνο το μεθάνιο (από όλα τα στοιχεία του φυσικού αερίου είναι το σημαντικότερο και στη μεγαλύτερη περιεκτικότητα) έχουμε:



$$\text{Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση καύσης ισχύει: } \left( \frac{n_{\text{O}_2}}{n_f} \right)_{\text{stoich}} = \frac{2}{1} = 2$$

Εφόσον ως καύσιμο (fuel) θεωρείται το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) ισχύει :

$$n_f = n_{\text{CH}_4} = \frac{m_f}{\text{MW}_{\text{CH}_4}} = \frac{115.58}{16} = 7.224 \text{ moles}$$

$$(\alpha) \rightarrow n_{\text{O}_2} = \lambda \times \left( \frac{n_{\text{O}_2}}{n_f} \right)_{\text{stoich}} \times n_f = 2.1 \times 2 \times 7.224 \rightarrow n_{\text{O}_2} = 30.3406 \text{ moles}$$

Αέρας:

$$n_a = \frac{n_{\text{O}_2}}{0.21} = \frac{30.3406}{0.21} \rightarrow n_a = 144.48 \text{ moles}$$

$$m_a = n_a \times \text{MW}_a = 144.48 \times 28.84 \rightarrow m_a = 4166.779 \text{ gr}$$

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

διότι  $MW_{\alpha} = 0.21 \times MW_{O_2} + 0.79 \times MW_{N_2} = 0.21 \times 2 \times 16 + 0.79 \times 2 \times 14 = 28.84 \text{ gr/mole}$

$$\xi_i = \frac{m_i}{m_{\text{tot}}} = \frac{n_i \times MW_i}{m_{\text{tot}}} = \frac{n_i \times MW_i}{m_{\text{tot}}} \times \frac{n_{\text{tot}}}{n_{\text{tot}}} = \frac{(n_i/n_{\text{tot}}) \times MW_i}{m_{\text{tot}}} \times n_{\text{tot}} =$$

$$= \frac{X_i \times MW_i}{m_{\text{tot}}} \times n_{\text{tot}} \rightarrow \boxed{\xi_i = \frac{X_i \times MW_i}{m_{\text{tot}}} \times (n_f + n_a)} \quad (\beta)$$

με  $m_{\text{tot}} = m_f + m_a = 115.58 + 4166.779 = 4282.363 \text{ gr}$

**Γ. Μετατροπή μονάδων ppm NOx σε gr/kWh NOx**

Έστω ότι η δεδομένη μέτρηση για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι **222 ppm**. Τα οξείδια του αζώτου NOx συνίστανται κατά βάση από μονοξείδια του αζώτου (NO) και από διοξείδια του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Είναι γνωστό ότι τα NO αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών οξειδίων του αζώτου (NOx) συνεπώς γίνεται η παρακάτω υπόθεση για τις εκπομπές:

**Εκπομπές NO: 200 ppm**

**Εκπομπές NO<sub>2</sub>: 22 ppm**

Άρα:

$$X_{NO} = 200 \times 10^{-6}$$

$$X_{NO_2} = 22 \times 10^{-6}$$

Συνεπώς, για τα ποσοστά μάζας ( $\xi_i$ ) των δύο συστατικών σύμφωνα με τη σχέση (β) ισχύει:

$$\xi_{NO} = \frac{200 \times 10^{-6} \times 30}{4282.363} \times (7.224 + 144.479) = \frac{200 \times 10^{-6} \times 30}{4282.363} \times 151.7031 \rightarrow \xi_{NO} = 0.000212551$$

$$\xi_{NO_2} = \frac{22 \times 10^{-6} \times 46}{4282.363} \times (7.224 + 144.479) = \frac{22 \times 10^{-6} \times 46}{4282.363} \times 151.7031 \rightarrow \xi_{NO_2} = 0.00003585$$

Η συνολική μάζα των εκπεμπόμενων οξειδίων του αζώτου προκύπτει :

$$m_{NOx} = (\xi_{NO} + \xi_{NO_2}) \times m_{\text{tot}} = (0.000212551 + 0.00003585) \times 4282.363 \rightarrow m_{NOx} = 1.063742 \text{ gr}$$

Για την ειδική εκπομπή των οξειδίων του αζώτου ισχύει:

$$\text{Ειδ.εκπομπή NOx} = \frac{m_{NOx} \times \eta \times 3600}{P \times 30 \times k} = \frac{1.0637 \times 500 \times 3600}{11400 \times 30 \times 4} = \mathbf{1.40 \text{ gr/kWh}}$$

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Οι κανονισμοί του IMO(Tier III) ορίζουν το ανώτερο επιτρεπτό όριο εκπομπών NOx :

$$\text{Upper limit}_{\text{IMO Tier III}} = 9 \times n^{-0.2} = 9 \times 500^{-0.2} = \mathbf{2.5969 \text{ gr/kWh}}$$

Συμπερασματικά, ο κανονισμός ικανοποιείται και μάλιστα με μεγάλο περιθώριο. Επιπλέον, το αποτέλεσμα συμφωνεί με τα δεδομένα του κατασκευαστή σύμφωνα με τα οποία για 100% φορτίο της μηχανής οι εκπομπές NOx της μηχανής είναι λιγότερες από 2 gr/kWh.

**Δ. Μετατροπή μονάδων % κατά όγκο CO<sub>2</sub> (%Vol CO<sub>2</sub>) σε gr/kWh CO<sub>2</sub>**

Υπόθεση : Έστω **4.752 % κ.ο. CO<sub>2</sub>** .

Αυτό σημαίνει ότι η γραμμωριακή περιεκτικότητα σε CO<sub>2</sub>  $\left(\frac{\text{moles}_{\text{CO}_2}}{\text{TOTALmoles}}\right)$  είναι :

$$X_{\text{CO}_2} = 0.04752$$

Συνεπώς, σύμφωνα με τη σχέση (β) το ποσοστό μάζας του CO<sub>2</sub> είναι :

$$\xi_{\text{CO}_2} = \frac{0.0452 \times 44}{4283.363} \times 151.7031 \rightarrow \xi_{\text{CO}_2} = 0.07407$$

Η μάζα του CO<sub>2</sub> προκύπτει:

$$m_{\text{CO}_2} = \xi_{\text{CO}_2} \times m_{\text{tot}} = 0.07407 \times 4283.363 \rightarrow m_{\text{CO}_2} = 317.193 \text{ gr}$$

Για την ειδική εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα ισχύει:

$$\text{Ειδ.εκπομπή CO}_2 = \frac{m_{\text{CO}_2} \times n \times 3600}{P \times 30 \times k} = \frac{317.193 \times 500 \times 3600}{11400 \times 30 \times 4} = \mathbf{417.36 \text{ gr/kWh}}$$

**Ε. Αντίστροφη διαδικασία (Μετατροπή μονάδων gr/kWh CO<sub>2</sub> σε % κατά όγκο CO<sub>2</sub> (%Vol CO<sub>2</sub>))**

Ο κατασκευαστής της μηχανής δίνει : Ειδ.εκπομπή CO<sub>2</sub> σε 100% φορτίο = 430 gr/kWh

$$\text{Ειδ.εκπομπή CO}_2 = \frac{m_{\text{CO}_2} \times n \times 3600}{P \times 30 \times k} \rightarrow 430 = \frac{m_{\text{CO}_2} \times 500 \times 3600}{11400 \times 30 \times 4} \rightarrow m_{\text{CO}_2} = 326.8 \text{ gr}$$

$$\text{Άρα: } n_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{MW_{\text{CO}_2}} = \frac{326.8}{44} = 7.4273 \text{ moles}$$

$$\text{Συνεπώς: } X_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{tot}}} = \frac{7.4273}{151.7031} = 0.04896 \text{ ή } 4.896 \% \text{ κ.ο.}$$

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**4.3.3 Παράθεση αποτελεσμάτων των εκπομπών CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> σε gr/kWh**

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, τα αποτελέσματα για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> σε % Vol και ppm αρχικά και σε gr/kWh ύστερα, για όλες τις καταστάσεις, και για τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία είναι:

*Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα εκπομπών ρύπων πριν τη μετατροπή των μονάδων*

	Κατάστασις	ΠΛΟΙΟ 1		ΠΛΟΙΟ 3	
		CO <sub>2</sub> (% Vol)	NO <sub>x</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (% Vol)	NO <sub>x</sub> (ppm)
Boil off gas burning mode	Sea going	4.752	222	4.704	222
	Maneuvering with bow thruster - At port in/out	4.704	222	4.664	222
	Cargo unloading	4.68	224	4.504	210
	Cargo loading	4.696	222	4.696	222
	Idle mode	4.296	193.8	3.77	150.6
Fuel Oil burning mode	Sea going	5.94	1110	5.87	1110
	Maneuvering with bow thruster – At port in/out	5.88	1110		
	Cargo unloading	5.84	1120		
	Cargo loading	5.86	1120		
	Idle mode	5.16	899		

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**Πίνακας 4.9:** Ποσοστά φόρτισης και προκύπτουσες από την παρεμβολή τιμές κατανάλωσης

		ΠΛΟΙΟ 1		ΠΛΟΙΟ 3	
		% loading	Consumption	% loading	Consumption
Boil off gas burning mode	Sea going	89.1	7400 kJ/kWh	78.475	7560 kJ/kWh
	Maneuvering with bow thruster - At port in/out	80.8	7520 kJ/kWh	56.483	8060 kJ/kWh
	Cargo unloading	59.4	7980 kJ/kWh	40.939	8570 kJ/kWh
	Cargo loading	70.6	7710 kJ/kWh	69.415	7740 kJ/kWh
	Idle mode	32	8920 kJ/kWh	18.735	9510 kJ/kWh
Fuel Oil burning mode	Sea going	88.7	189 gr/kWh	76.194	192 gr/kWh
	Maneuvering with bow thruster – At port in/out	80.8	191 gr/kWh		
	Cargo unloading	56.8	200 gr/kWh		
	Cargo loading	65.4	195 gr/kWh		
	Idle mode	26.8	226 gr/kWh		

**Πίνακας 4.10:** Αποτελέσματα εκπομπών ρύπων μετά τη μετατροπή των μονάδων

		ΠΛΟΙΟ 1		ΠΛΟΙΟ 3	
Κατάστασις		CO <sub>2</sub> (gr/kWh)	NO <sub>x</sub> (gr/kWh)	CO <sub>2</sub> (gr/kWh)	NO <sub>x</sub> (gr/kWh)
Boil off gas burning mode	Sea going	423.0765	1.4188	427.8582	1.4495
	Maneuvering with bow thruster - At port in/out	425.5944	1.4418	452.2768	1.5454
	Cargo unloading	449.3239	1.5466	464.3976	1.5438
	Cargo loading	435.6054	1.4783	437.3003	1.4840
	Idle mode	461.0414	1.4914	431.3528	1.2373

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

<b>Fuel Oil burning mode</b>	Sea going	648.3362	8.6970	650.8656	8.8351
	Maneuvering with bow thruster – At port in/out	648.5787	8.7891		
	Cargo unloading	674.5200	9.2820		
	Cargo loading	659.9093	9.0500		
	Idle mode	673.4574	8.4698		

**4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των εκπομπών CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> με τα όρια των κανονισμών**

Σε ό,τι αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, υπάρχει ο δείκτης ΕΕΟΙ ως μέσο ελέγχου των εκπομπών. Σε ό,τι αφορά το ανώτατο επιτρεπτό όριο για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς ισχύει:

$$\text{Upper limit (Tier II)} = 44 \times n^{-0.23} \text{ gr/kWh}$$

$$\text{Upper limit (Tier III)} = 9 \times n^{-0.2} \text{ gr/kWh}$$

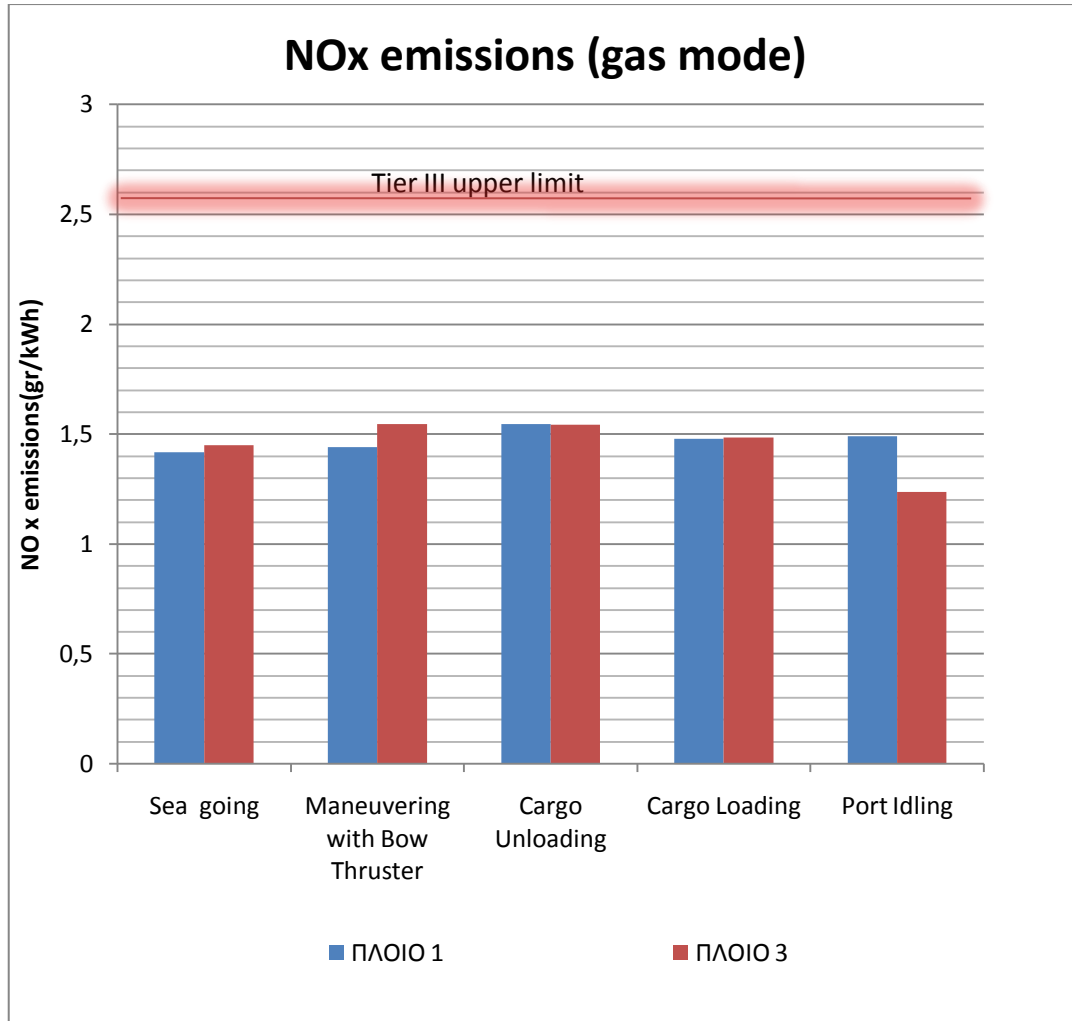
Άρα για τα συγκεκριμένα πλοία με  $n = 514$  RPM ισχύει:

$$\text{Upper limit (Tier II)} = 44 \times 514^{-0.23} = 10.46963 \text{ gr/kWh}$$

$$\text{Upper limit (Tier III)} = 9 \times 514^{-0.2} = 2.582557 \text{ gr/kWh}$$

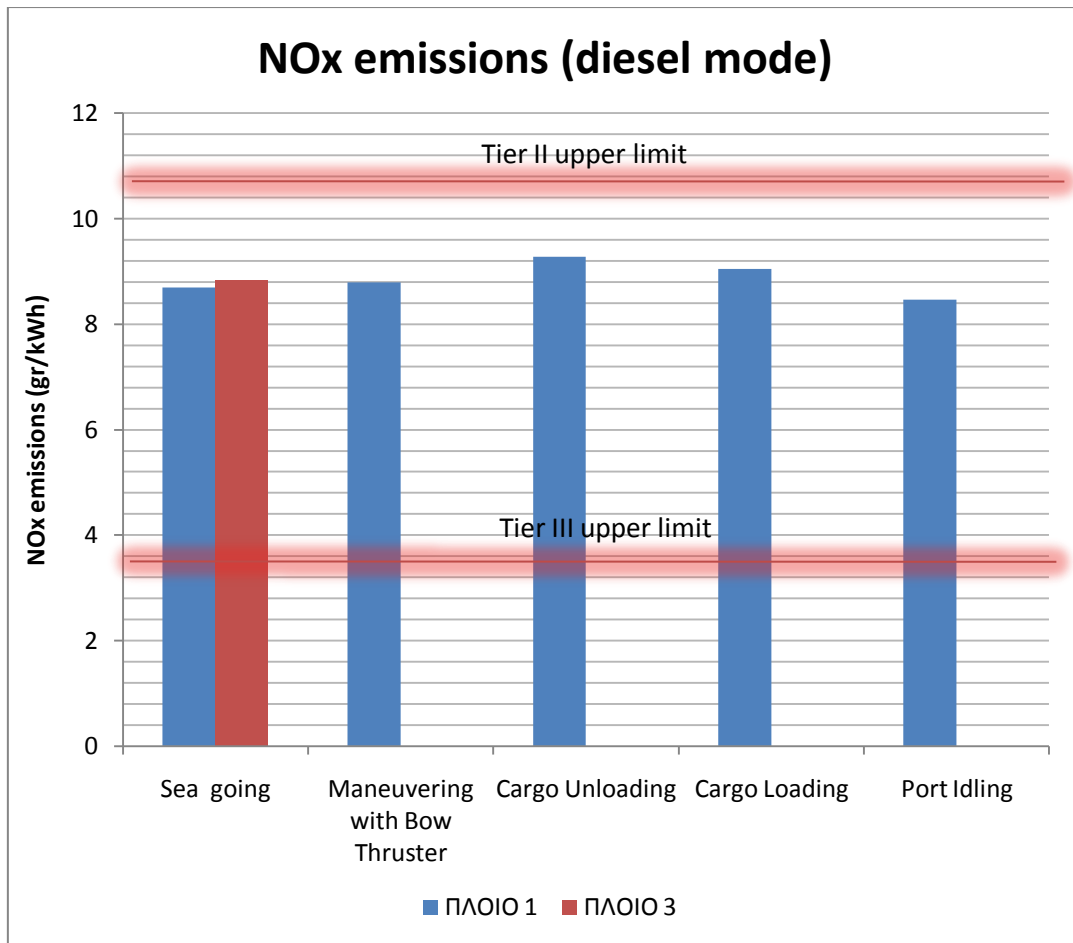
Παρατηρείται ό,τι και τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία LNG ικανοποιούν τον περιορισμό Tier II (εφαρμογή σε πλοία κατασκευής μετά το 2011) οποιοδήποτε καύσιμο και αν χρησιμοποιούν και σε οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας, ακόμα και στις καταστάσεις λειτουργίας εντός λιμανιού όπου είναι λογικό η ειδική εκπομπή να αυξάνεται. Στην περίπτωση του Tier III (εφαρμογή σε πλοία κατασκευής μετά το 2016) οι περιορισμοί γίνονται πολύ πιο αυστηροί και σημειώνεται ότι ικανοποιούνται σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας αρκεί όμως το πλοίο να χρησιμοποιεί ως καύσιμο boil off gas. Αυτό προφανώς οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πλέον όλο και συχνότερα, με το πέρασμα των ετών, θα δίνεται έμφαση στη χρήση αυτού του καυσίμου και όχι του βαρέος πετρελαίου.

Η σύγκριση των εκπομπών NO<sub>x</sub> με τα όρια των κανονισμών, για όλες τις καταστάσεις, παρουσιάζεται ραβδογραμματικά παρακάτω:



Σχήμα 4.15: Εκπομπές NOx για τα πλοία 1 και 3 (gas mode) και όριο Tier III





Σχήμα 4.16: Εκπομπές NOx για τα πλοία 1 και 3 (diesel mode) και όρια Tier II,III

#### 4.4 Εκπομπές ρύπων CO<sub>2</sub> και NOx για το συμβατικής πρόωσης LNG carrier (ΠΛΟΙΟ 2)

Από τα διαθέσιμα στοιχεία ταξιδιού (ταξίδι Νοεμβρίου 2012) ισχύει:

Συνολικές Εκπομπές CO<sub>2</sub> = 8293.66 tons

Συνολικές Εκπομπές NOx = 0.21 tons

Από τα στοιχεία του εγχειριδίου λειτουργίας της μηχανής (Machinery Operating Manual) ισχύει ότι υπό κανονικές συνθήκες η παραγόμενη ισχύς της μηχανής είναι 33500 PS = 24656 kW. (Χρησιμοποιείται η τιμή από το εγχειρίδιο λειτουργίας, καθώς τα στοιχεία του ταξιδιού του Νοεμβρίου του 2012 δεν περιλαμβάνουν την συνολική ισχύ εν πλώ.

Η διάρκεια του ταξιδιού είναι 673 hours σύμφωνα με τα στοιχεία. Επομένως, τελικά θα ισχύει για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και NOx :

$$\text{Ειδ.εκπομπή CO}_2 = 8293660000 \text{ gr} / (24656\text{kW} \times 673\text{hours}) = 499.814 \text{ gr/kWh}$$

$$\text{Ειδ.εκπομπή NO}_x = 210000 \text{ gr} / (24656\text{kW} \times 673\text{hours}) = 0.013 \text{ gr/kWh}$$

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑΣ

Αρχικά, η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει κάποιες αναφορές στους κανονισμούς και τη γενικότερη περιβαλλοντική πολιτική του ΙΜΟ για τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων. Γίνονται πολύ σημαντικές προσπάθειες για τη μείωση της συνεισφοράς των πλοίων στην παγκόσμια ρύπανση. Θεσπίζονται αυστηρότεροι κανονισμοί και καθορίζονται περιοχές περιορισμού των εκπομπών ρύπων. Η εισαγωγή δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητας για τις διάφορες καταστάσεις πλεύσης κρίνεται σημαντικό βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στο δείκτη EEDI, στα μεγέθη που τον απαρτίζουν και στην ιστορικές συνόδους MEPC, μέσω των οποίων διαμορφώθηκε ο τελικός τύπος υπολογισμού του δείκτη.

Η αντικατάσταση των «παραδοσιακών» ναυτιλιακών καυσίμων με νέα καθαρότερα και πιο οικολογικά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο αποτελεί σημαντικό βήμα για να καταστούν τα πλοία πιο φιλικά προς το περιβάλλον. **Αναφέρθηκαν**, λοιπόν, όλα εκείνα τα πλεονεκτήματα του φυσικού αερίου που σε συνδυασμό με την ηλεκτροπρόωση καθιστούν το πλοίο πιο οικονομικό και ενεργειακά πιο αποδοτικό.

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μία αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία που συνεχώς κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια μεταξύ των άλλων, λόγω και της γενικά εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και κυρίως στον τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος. Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτροπρόωσης.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα κατά τη λειτουργία απεικονίζεται με τον δείκτη EEOI ο οποίος, μετά τους υπολογισμούς, προέκυψε σαφώς μικρότερος για το πλοίο ηλεκτρικής πρόωσης σε σύγκριση με το όμοιο πλοίο συμβατικής πρόωσης, επιβεβαιώνοντας την ξεκάθαρη υπεροχή της ηλεκτροπρόωσης σε θέματα ενεργειακής αποδοτικότητας. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, εφόσον είναι γνωστό ότι οι μηχανές που προορίζονται να κινούν γεννήτριες λειτουργούν σε σταθερά εύρη

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

στροφών άρα παρουσιάζουν πολύ πιο σταθερά χαρακτηριστικά σε σχέση με αυτές που κινούν απ'ευθείας τον άξονα. Η σταθερότητα αυτή στη λειτουργία έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη κατανάλωση και ως εκ τούτου μειωμένη εκπομπή ρύπων.

Σε ό,τι αφορά το δείκτη EEDI, αυτός **κρίνεται** ανεπαρκής ως κριτήριο για την ενεργειακή αποδοτικότητα των ηλεκτρικών πλοίων καθώς χρησιμοποιεί μία συγκεκριμένη τιμή ισχύος για τον υπολογισμό και έτσι δε λαμβάνει υπόψιν του τη δυνατότητα που έχει το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης να αναπροσαρμόζει τη λειτουργία των κινητήρων και των γεννητριών ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις ισχύος. Συν τοις άλλοις, ο δείκτης EEDI χρησιμοποιεί ονομαστικά χαρακτηριστικά (ταχύτητα, ισχύς) τα οποία ουδεμία σχέση έχουν με τα πραγματικά στοιχεία ταξιδιού (η διαφορά π.χ. στην ταχύτητα ήταν 4 κόμβοι).

Κρίνοντας λοιπόν ως ικανό κριτήριο ενεργειακής αποδοτικότητα το δείκτη EEOI, **προτείνουμε** μέσω της παρούσας εργασίας δύο δείκτες αντίστοιχους με τον EEOI για τις καταστάσεις εντός λιμανιού (maneuvering, cargo handling), για τις οποίες αναμένεται αυστηροποίηση των κανονισμών τα επόμενα χρόνια.

Σε ό,τι αφορά τις εκπομπές ρύπων και συγκεκριμένα τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, **παρατηρήθηκε** ό,τι και τα δύο ηλεκτροκίνητα πλοία LNG ικανοποιούν τον περιορισμό Tier II (εφαρμογή σε πλοία κατασκευής μετά το 2011) οποιοδήποτε καύσιμο και αν χρησιμοποιούν και σε οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας, ακόμα και στις καταστάσεις λειτουργίας εντός λιμανιού όπου είναι λογικό η ειδική εκπομπή να αυξάνεται. Στην περίπτωση του Tier III (εφαρμογή σε πλοία κατασκευής μετά το 2016) οι περιορισμοί γίνονται πολύ πιο αυστηροί και σημειώνεται ότι ικανοποιούνται σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας αρκεί όμως το πλοίο να χρησιμοποιεί ως καύσιμο boil off gas. Αυτό προφανώς οδηγεί στο **συμπέρασμα** ότι πλέον όλο και συχνότερα, με το πέρασμα των ετών, θα δίνεται έμφαση στη χρήση αυτού του καυσίμου και όχι του βαρέος πετρελαίου. Τέλος, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται αρκετά για χρήση βαρέος πετρελαίου ως καύσιμο σε σύγκριση με το καύσιμο φυσικό αέριο επιβεβαιώνοντας τη ρήση ότι το φυσικό αέριο αποτελεί ένα πολύ πιο καθαρό καύσιμο.

Αναφορικά με το ποσοστό λειτουργίας των γεννητριών, **προέκυψε** ότι αυτές ενδέχεται να λειτουργούν σε πολύ χαμηλό ποσοστό (περίπου 20%) σε καταστάσεις αγκυροβολίου. **Προτείνεται** η αλλαγή του βέλτιστου σημείου λειτουργίας των γεννητριών από το 80% στο 60% από τους κατασκευαστές, έτσι ώστε να μην υπάρχουν έντονα φαινόμενα υπολειτουργίας και αστάθειας.

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

Τέλος, προτείνεται περαιτέρω έρευνα σε στατιστικές και εκτεταμένες συγκρίσεις των δεικτών ενεργειακής απόδοσης μεταξύ ηλεκτροκίνητων πλοίων. Η δημιουργία μίας βάσης δεδομένων για τα ηλεκτροκίνητα πλοία θα είναι εφικτή στο προσεχές μέλλον με την κατασκευή όλο και περισσότερων τέτοιων πλοίων.

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ:**

**Υπολογισμοί:**

- Υπολογίσθηκε ο δείκτης EEOI για ένα συμβατικό πλοίο και δύο ηλεκτροκίνητα πλοία, όλα όμοιας χωρητικότητας πλοία, έτσι ώστε να είναι εφικτή η άμεση σύγκριση.
- Έγινε προσπάθεια υπολογισμού με δύο διαφορετικούς τρόπους του δείκτη EEDI για τα ηλεκτροκίνητα πλοία, παρόλο που, έως τώρα, ο δείκτης EEDI δεν εφαρμόζεται για πλοία ηλεκτρικής πρόωσης. Υπολογίσθηκε ο δείκτης EEDI για το συμβατικό πλοίο.
- Υπολογίσθηκαν οι εκπομπές ρύπων για τα τρία πλοία και έγινε σύγκριση με τους διεθνείς κανονισμούς σε ό,τι αφορά τις εκπομπές NO<sub>x</sub>, αφού πρώτα έγινε μετατροπή των μονάδων rpm και %Vol στις μονάδες των διεθνών κανονισμών gr/kWh.

**Προτάσεις:**

- Δημιουργία δεικτών λειτουργίας ενεργειακής αποδοτικότητας για καταστάσεις όπου δεν υφίσταται η έννοια του μεταφορικού έργου, δηλαδή για καταστάσεις ελιγμών στο λιμάνι ή καταστάσεις διαχείρισης φορτίου.
- Αλλαγή στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας των γεννητριών από τους κατασκευαστές λόγω του πολύ χαμηλού ποσοστού φόρτισης αυτών σε περιπτώσεις αγκυροβολίου.
- Περαιτέρω έρευνα σε μεγαλύτερο στατιστικό δείγμα ηλεκτροκίνητων πλοίων σε ό,τι αφορά τους δείκτες ενεργειακής απόδοσης, με στόχο τη δημιουργία επαρκούς βάσης δεδομένων και την πιο ολοκληρωμένη πραγματοποίηση συγκρίσεων μεταξύ των πλοίων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

- [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)
- <http://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- [www.wartzila.com](http://www.wartzila.com)
- [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp29grpe/LNG\\_TF-02-06e.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2011/wp29grpe/LNG_TF-02-06e.pdf)  
(what is boil off)
- <http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/SNAME/ce7dbd62-cb5f-4739-abc2-44ac55b35df0/UploadedImages/Teekay%20Sname%20Presentation%20rev3.pdf>  
(Εικόνα dual fuel electric)
- <http://www.chart-ferox.com/systems/systems-lng-systems-ship-refueling.htm>  
Σύσταση του LNG –ρύποι
- [www.shipbuildinghistory.com](http://www.shipbuildinghistory.com)  
(Ονομαστική ταχύτητα-Vref για το δείκτη EEDI για τα 3 πλοία)

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- Διπλωματική εργασία «Ship energy efficiency indices within the framework of IMO», Νικόλαος Κ. Τσεκούρας, Ιούλιος 2011
- Διπλωματική εργασία «Σχεδιαστικός δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy efficiency design index-EEDI), ανασκόπηση εξέλιξης διεθνών κανονισμών, σχεδιαστικά και επιχειρησιακά μέτρα, παραδείγματα εφαρμογής», Ελευθέριος Α.Πάγκαλος, Ιούνιος 2011
- Διπλωματική εργασία «Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυβελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές – Μελέτη και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος», Νικόλαος Γ. Μπαϊραχάρης, Μάρτιος 2011  
[http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4594/1/bairachtarism\\_fcpropulsionsystem.pdf](http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/4594/1/bairachtarism_fcpropulsionsystem.pdf)  
(Ιστορική αναδρομή ηλεκτροπρόωσης)

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

- Διπλωματική εργασία «Ενσωμάτωση φορητού συστήματος μέτρησης πίεσης κυλίνδρων στο σύστημα μέτρησης αέριων ρύπων και ισχύος ναυτικών κινητήρων του ENM», Παναγιώτης Μπουσούνης, Οκτώβριος 2011

**ΑΡΘΡΑ-ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

- [http://library.tee.gr/digital/m2102/m2102\\_hatzilaou.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2102/m2102_hatzilaou.pdf)  
(ορισμός ηλεκτροπρόωσης)
- [http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c1256cc400313660c125721a002947b8/\\$file/article\\_e1%20prop%20for%20lng%20carriers\\_10\\_04.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c1256cc400313660c125721a002947b8/$file/article_e1%20prop%20for%20lng%20carriers_10_04.pdf)  
(+ - ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΟΩΣΗΣ)
- Ναυτικά Χρονικά 11-2012 (MEPC 64)  
(Σύνοδοι MEPC)
- CMTI  
<http://www.cmti.nl/wp-content/uploads/2011/07/110706-EEDI-study-CMTI-2010-AL.pdf>
- <http://www.chemeng.ntua.gr/courses/pngtech/files/Natural%20Gas%20Properties>.  
*Πίνακας 2.2*
- MEPC.1/Circular 681 (INTERIM GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX FOR NEW SHIPS) (2009)
- MEPC.1/Circular 684 (GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI)) (2009)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Εικόνες-Σχήματα

**Σχήμα 1.1 :** Συνεισφορά μεταφορών στην ατμοσφαιρική ρύπανση αναλογικά με το μεταφορικό τους έργο (gr/tm-km)

**Σχήμα 1.2 :** Χάρτης του DNV για τις περιοχές περιορισμένων εκπομπών ρύπων (ECA 's).

**Σχήμα 1.3 :** Χάρτης της Wartsila για τις περιοχές περιορισμένων εκπομπών ρύπων (ECA 's).

**Σχήμα 1.4 :** Όρια εκπομπών NO<sub>x</sub> για κινητήρες Diesel.

**Σχήμα 1.5 :** Μέγιστη περιεκτικότητα του fuel oil σε θείο και ημερομηνίες εφαρμογής.

**Σχήμα 1.6 :** Σχηματική αναπαράσταση των αντικειμένων υπολογισμού για τον EEDI

**Σχήμα 1.7 :** Γραμμή αναφοράς EEDI<sub>BL</sub>

**Εικόνα 2.1** S/S Normandie (1935)

**Εικόνα 2.2** Κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” με azirpod (κάτω δεξιά) με σημαντικό ελεύθερο χώρο.

**Εικόνα 2.3:** Γενικό διάγραμμα συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου.

**Εικόνα 2.4:** Dual Fuel Diesel Electric propulsion system

**Σχήμα 2.5:** Βαθμός απόδοσης από την παροχή του καυσίμου έως τον άξονα της προπέλας ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης διπλού καυσίμου (dual fuel electric propulsion plant) σε σύγκριση με ένα σύστημα συμβατικής πρόωσης (steam propulsion plant).

**Σχήμα 2.6:** Τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης

**Εικόνα 2.7:** Εκπομπές διαφόρων ρύπων ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου

**Σχήμα 3.1 :** τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης

**Σχήμα 4.1:** Εκπομπές CO<sub>2</sub> για το πλοίο 1

**Σχήμα 4.2:** Εκπομπές NO<sub>x</sub> για το πλοίο 1

**Σχήμα 4.3:** Εκπομπές CO για το πλοίο 1 (HFO mode)

**Σχήμα 4.4:** Εκπομπές CO για το πλοίο 1 (HFO mode)

**Σχήμα 4.5:** Εκπομπές C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> για το πλοίο 1 (HFO mode)

**Εικόνα 4.6 :** Το πλοίο 1 στο Kawasaki της Ιαπωνίας (14-06-2012)

**Σχήμα 4.7:** Εκπομπές CO<sub>2</sub> για το πλοίο 3

**Σχήμα 4.8:** Εκπομπές NO<sub>x</sub> για το πλοίο 3



**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

*Σχήμα 4.9: Εκπομπές CO για το πλοίο 3 (HFO mode)*

*Σχήμα 4.10: Εκπομπές CO για το πλοίο 3 (HFO mode)*

*Σχήμα 4.11: Εκπομπές CO για τα πλοία 1 και 3 (BOG mode)*

*Σχήμα 4.12: Εκπομπές NOx για τα πλοία 1 και 3 (BOG mode)*

*Σχήμα 4.13: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για τα πλοία 1 και 3 (HFO mode)*

*Σχήμα 4.14: Εκπομπές NOx για τα πλοία 1 και 3 (HFO mode)*

*Σχήμα 4.15: Εκπομπές NOx για τα πλοία 1 και 3 (gas mode) και όριο Tier III*

*Σχήμα 4.16: Εκπομπές NOx για τα πλοία 1 και 3 (diesel mode) και όρια Tier II,III*

**Πίνακες**

*Πίνακας 1.1: Συντελεστής εκπομπής CO<sub>2</sub> για κάθε τύπο καυσίμου*

*Πίνακας 1.2:  $f_{j0}$  και  $f_{j,min}$  για πλοία ειδικού σχεδιασμού*

*Πίνακας 1.3:  $f_{i0}$  και  $f_{i,max}$  για πλοία ειδικού σχεδιασμού*

*Πίνακας 2.1: Εκπομπές διαφόρων ρύπων ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου*

*Πίνακας 2.2: Σύσταση φυσικού αερίου ανάλογα με τη χώρα προέλευσής του*

*Πίνακας 3.1: Στοιχεία ταξιδιού και δείκτης EEOI για το ΠΛΟΙΟ 1*

*Πίνακας 3.2: Στοιχεία ταξιδιού και δείκτης EEOI για το ΠΛΟΙΟ 2*

*Πίνακας 3.3: Στοιχεία ταξιδιού (ταχύτητα πλεύσης και ώρες πλεύσης) για το ΠΛΟΙΟ 1*

*Πίνακας 3.4: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης εξαρτημάτων σε σύστημα ηλεκτροπρόωσης*

*Πίνακας 4.1: Τιμές εκπεμπόμενων ρύπων για διάφορα ποσοστά φόρτισης*

*Πίνακας 4.2: Τιμές εκπεμπόμενων ρύπων ανηγμένες ως προς το ποσοστό λειτουργίας*

*Πίνακας 4.3: Ποσοστά φόρτισης και τιμές ρύπων για την κατάσταση boil off gas burning(πλοίο 1)*

*Πίνακας 4.4: Ποσοστά φόρτισης και τιμές ρύπων για την κατάσταση fuel oil burning(πλοίο 1)*

*Πίνακας 4.5: Ποσοστά φόρτισης και τιμές ρύπων (πλοίο 3)*

*Πίνακας 4.6: Τιμές εκπομπών ρύπων για τα πλοία 1 και 3*

*Πίνακας 4.7: Ειδική κατανάλωση ενέργειας/καυσίμου (product guide Wartsila 50DF)*

*Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα εκπομπών ρύπων πριν τη μετατροπή των μονάδων*

*Πίνακας 4.9: Ποσοστά φόρτισης και προκύπτουσες από την παρεμβολή τιμές κατανάλωσης*

*Πίνακας 4.10: Αποτελέσματα εκπομπών ρύπων μετά τη μετατροπή των μονάδων*

**Θεόδωρος Κουτσούρης**  
**Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση**

**Συντομογραφίες**

A/E	Auxilliary Engine
AES	All Electric Ship
BOG	Boil Off Gas
BSEC	Break Specific Energy Consumption
CMTI	Centrum Maritieme Technologie en Innovatie
COTS	Commercial off the shelf
CPP	Controllable Pitch Propellers
DNV	Der Norske Veritas
ECA's	Emission Controlled Areas
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEDI <sub>A</sub>	Attained Energy Efficiency Design Index
EEDI <sub>BL</sub>	Baseline Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
EIAPP	Engine International Air Pollution Prevention
FPP	Fixed Pitch Propellers
GHG	Greenhouse Gases
GRT	Gross Tonnage
HFO	Heavy Fuel Oil
IACS	International Association of Classification Societies
IMCO	International Maritime Consultative Organization
IMO	International Maritime Organization
IPPC	International Plant Protection Convention
LFO	Light Fuel Oil
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MCR	Maximum Continous Rating
MDO	Marine Diesel Oil
M/E	Main Engine
MEPC	Marine Environment Protection
MGO	Marine Gas Oil
PM	Particulate Matter
ppm	Parts Per Million
PTI	Power Take In
PTO	Power Take off
RPM	Revolutions Per Minute
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFC	Specific Fuel Consumption
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption
TEU	Twenty feet equivalent unit
VOC	Volatile Organic Compound