

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ  
ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

ΣΤΡΑΤΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2015

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ι.ΠΡΟΥΣΑΛΙΔΗΣ (Επιβλέπων καθηγητής)

Χ.ΦΡΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ

Δ.ΛΥΡΙΔΗΣ

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την τεχνοοικονομική μελέτη σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα στοιχεία αφορούν πραγματικά εμπορικά πλοία.

Ευχαριστώ λοιπόν το προσωπικό της ναυτιλιακής εταιρίας 'MARAN GAS' και ιδιαίτερα τον κύριο Α.Σπέρτο για την αμέριστη βοήθεια και τα στοιχεία που μου παρέιχαν. Χωρίς αυτά δε θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας μελέτης.

Επίσης νιώθω της ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Προυσαλίδη για τη συνεχή καθοδήγηση και το χρόνο που μου αφιέρωσε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής.

## Περιεχόμενα

<b>Περιεχόμενα.....</b>	<b>3</b>
<b>Πρόλογος.....</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Πλαίσιο κανονισμών IMO.....	8
1.2.1 Πλαίσιο κανονισμών IMO για εκπομπές NO <sub>x</sub> .....	9
1.2.2 Πλαίσιο κανονισμών IMO για εκπομπές SO <sub>x</sub> .....	10
1.3 Τρόποι Περιορισμού Εκπομπών SO <sub>x</sub> .....	11
1.3.1 Συστήματα Scrubbers.....	11
1.3.2 Χρήση πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.....	13
1.4 Υγροποιημένο Φυσικό αέριο.....	15
1.4.1 Διαδικασίες Υγροποίησης.....	16
1.4.2 LNG carriers συμμετοχή στην παγκόσμια οικονομία.....	19
1.4.3 Κίνητρα ανάπτυξης, χαρακτηριστικά και εξελίξεις της διεθνούς αγοράς LNG.....	20
1.5 Ενεργειακός δείκτης EEDI.....	20
1.5.1 Ορισμός του δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI).....	22
1.5.2 Προσαρμογή EEDI για πλοία με ηλεκτροπρόωση.....	26
1.6 Ενεργειακός δείκτης EEOI.....	27
1.6.1 Ορισμός EEOI.....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ.....</b>	<b>29</b>
2.1 Ορισμός.....	29
2.2 Ιστορική αναδρομή.....	29
2.3 Εφαρμογές-Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	30
2.4 Διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης.....	32
2.5 Λόγοι χρήσης ηλεκτροπρόωσης σε πλοία μεταφοράς LNG.....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΠΡΩΣΗ ΜΕ ΑΤΜΟ.....</b>	<b>38</b>
3.1 Ιστορική αναδρομή.....	38
3.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα.....	39
3.3 Διάταξη συστήματος πρόωσης με ατμοστρόβιλο.....	40
3.4 Συνοπτική περιγραφή των επιμέρους στοιχείων.....	41

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ &amp; ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΩΣΗΣ .....</b>	<b>47</b>
4.1 Γενικά στοιχεία.....	47
4.2 Υπολογισμός ολικής αντίστασης.....	47
4.2.1 Μέθοδος B.S.R.A.....	48
4.2.2 Μέθοδος FORM-DATA .....	53
4.2.3 Μέθοδος Lap-Keller .....	57
4.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής σειρών αντίστασης-Σύγκριση με μέθοδο Holtrop & Mennen.....	60
4.3 Υπολογισμός συντελεστών μείωσης ώσης και ομόρρου .....	62
4.4 Υπολογισμός ισχύος πρόωσης, συνεργασία πλοίου-έλικας.....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ ΣΕ LNG CARRIER .....</b>	<b>67</b>
5.1 Γενικά στοιχεία.....	67
5.2 Υπολογισμός δείκτη EEDI.....	67
5.2.1 Υπολογισμός δείκτη EEDI, Ά τρόπος .....	68
5.2.2 Υπολογισμός δείκτη EEDI, Β τρόπος .....	70
5.2.3 Παραμετροποίηση δείκτη EEDI κατά IMO .....	72
5.3 Υπολογισμός δείκτη EEOI.....	79
5.4 Κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών .....	80
5.4.1 Κατανάλωση καυσίμου.....	80
5.4.2 Κατανάλωση λιπαντικών.....	83
5.5 Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης .....	84
5.5.1 Βάρος μηχανημάτων.....	86
5.5.2 Βάρος καλωδιώσεων .....	88
5.6 Οικονομική μελέτη .....	90
5.6.1 Κόστος ανέγερσης πλοίου.....	90
5.6.2 Λειτουργικά έξοδα πλοίου.....	93
5.6.3 Καθαρή παρούσα αξία- Ελάχιστος ναύλος .....	97
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΩΣΗΣ ΜΕ ΑΤΜΟ ΣΕ LNG CARRIER .....</b>	<b>99</b>
6.1 Γενικά στοιχεία.....	99
6.2 Υπολογισμός δείκτη EEDI.....	99
6.3 Κατανάλωση καυσίμου.....	101
6.4 Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης .....	102
6.5 Οικονομική μελέτη .....	103
6.5.1 Βάρος άφορτου πλοίου .....	103

## Περιεχόμενα

6.5.2 Κόστος ανέγερσης πλοίου.....	103
6.5.3 Κόστος ενδιαίτησης και εξοπλισμού .....	104
6.5.4 Κόστος μηχανολογικού εξοπλισμού .....	104
6.5.5 Λειτουργικά έξοδα πλοίου .....	105
6.5.6 Καθαρή παρούσα αξία- Ελάχιστος ναύλος .....	108
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ</b>	
<b>ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>110</b>
7.1 Ανασκόπηση διπλωματικής .....	110
7.2 Σύγκριση-Αξιολόγηση αποτελεσμάτων .....	110
7.2.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα.....	110
7.2.2 Κατανάλωση καυσίμων και λυπαντικών .....	111
7.2.3 Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης.....	111
7.2.4 Οικονομική σύγκριση.....	112
7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	115
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>116</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ .....</b>	<b>118</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ</b>	
<b>ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ.....</b>	<b>126</b>
B.1 Κόστος μεταλλικής κατασκευής.....	126
B.2 Κόστος ενδιαίτησης-εξοπλισμού .....	128
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΙΝΑΚΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>130</b>
Γ.1 Σχήματα.....	130
Γ.2 Διαγράμματα.....	131
Γ.3 Πίνακες.....	132

## Πρόλογος

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η τεχνοοικονομική μελέτη και σύγκριση των συστημάτων ηλεκτροπρόωσης και πρόωσης με ατμό. Αναλύονται οι δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας, οι καταναλώσεις καυσίμου καθώς και τα βάρη της κάθε μηχανολογικής εγκατάστασης ενώ στο τέλος παρατίθενται τα οικονομικά στοιχεία για τη λειτουργία του κάθε συστήματος. Η σύγκριση επικεντρώνεται σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG carriers).

Αρχικά, αναλύεται το πλαίσιο των κανονισμών του IMO (International Maritime Organization) που στοχεύει στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου και του θείου (NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>) στη ναυτική βιομηχανία αποτελεί προτεραιότητα του πλαισίου αυτού. Οι ρυθμίσεις για τον περιορισμό των SO<sub>x</sub> γίνονται ολοένα και πιο αυστηρές με την πάροδο των χρόνων και η υιοθέτηση καινοτόμων συστημάτων (π.χ. Scrubbers) από τις ναυτιλιακές εταιρίες και η κατανάλωση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο αποτελούν σήμερα τις κυρίαρχες λύσεις. Παράλληλα με τον περιορισμό των εκπεμπόμενων οξειδίων, ο IMO έχει υιοθετήσει δύο δείκτες οι οποίοι χαρακτηρίζουν την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου. Ο πρώτος EEDI (Energy Efficiency Design Index) αφορά το στάδιο του σχεδιασμού του πλοίου ενώ ο δεύτερος EEOI (Energy Efficiency Operational Index) αναφέρεται στη λειτουργία του.

Στη συνέχεια, η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την πρόωση πλοίων με ηλεκτροκινητήρες και με ατμό. Πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή για τα δύο συστήματα πρόωσης, παραπείθονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, οι περιοχές εφαρμογής τους, οι βασικές αρχές της λειτουργίας τους αλλά και οι λόγοι για τους οποίους έχουν κυριαρχήσει μέχρι σήμερα σε πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου.

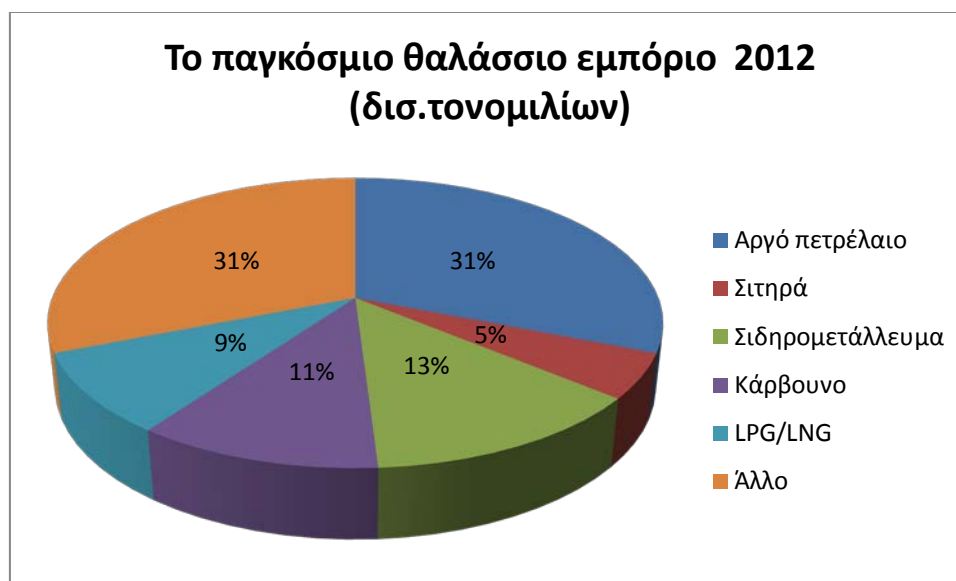
Ο υπολογισμός της αντίστασης και της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης για το πλοίο μεταφοράς φυσικού αερίου με ηλεκτροπρόωση αποτελεί το επόμενο θέμα της διπλωματικής. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι συστηματικές σειρές B.S.R.A, FORMDATA και LAP-KELLER. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα grid εκτιμάται η καμπύλη ταχύτητας-ισχύος πρόωσης. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της ταχύτητας του πλοίου κάθε φορά που είναι γνωστή η ισχύς στον άξονα του.

Επιπλέον, υπολογίζονται και συγκρίνονται οι ενεργειακοί δείκτες αποδοτικότητας για τα δύο πλοία. Για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση γίνεται μία προσπάθεια παρουσίασης του περιβαλλοντικού αποτυπώματός του ανάλογα με το ποσοστό φόρτισης των γεννητριών και την ταχύτητα πλεύσης του. Χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρολογικό ισολογισμό του ηλεκτροκίνητου πλοίου από την μία και το εγχειρίδιο λειτουργίας του ατμοκίνητου πλοίου από την άλλη, υπολογίζονται οι καταναλώσεις καυσίμου σε φυσικό αέριο (BOG), σε βαρύ πετρέλαιο (H.F.O) καθώς και οι καταναλώσεις λιπαντικών. Οι περιορισμοί για χρήση του καυσίμου σε ζώνες περιορισμένων εκπεμπόμενων ρύπων (ECA zones) λαμβάνονται υπόψιν.

Τέλος, για τα δύο συστήματα πρόωσης παρουσιάζεται διαδοχικά το βάρος των κυριότερων μηχανημάτων που αποτελούν το μηχανολογικό εξοπλισμό ενώ για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση εκτιμάται και το βάρος των καλωδιώσεων. Πραγματοποιείται οικονομική εκτίμηση της επένδυσης για κάθε μηχανολογικό σύστημα. Με βάση τις τρέχουσες τιμές του χάλυβα, των καυσίμων και των λιπαντικών υπολογίζεται το κόστος ανέγερσης των πλοίων, τα λειτουργικά έξοδα καθώς και ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος για το κάθε πλοίο. Η παρούσα διπλωματική κλείνει με προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ****1.1 Εισαγωγή**

Οι εκπομπές ρύπων από τη ναυτιλία σχετίζονται με τη ναυτιλιακή δραστηριότητα, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με την παγκόσμια οικονομία (εισαγωγές – εξαγωγές από θάλασσα). Η κατανόηση του μηχανισμού αυτού που ισχύει για τις θαλάσσιες μεταφορές και τις άλλες ναυτιλιακές δραστηριότητες είναι ζωτικής σημασίας για την καταγραφή των εκπομπών. Η δραστηριότητα της ναυτιλιακής βιομηχανίας εκφράζεται σε τονομύλια, τα οποία ισούνται με το γινόμενο της ποσότητας του φορτίου που μεταφέρεται επί τη μέση απόσταση μεταφοράς. Οι όγκοι των διαφόρων κατηγοριών φορτίου για το έτος 2012 εμφανίζονται στο σχήμα 1.1.

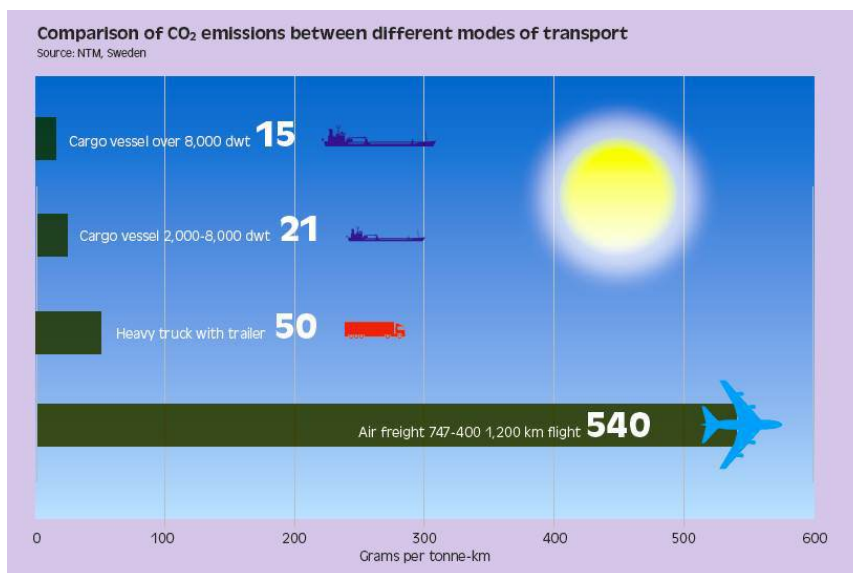


**Σχήμα 1.1 :** Το παγκόσμιο θαλάσσιο εμπόριο 2012  
Πηγή: ISL Shipping Statistics Yearbook 2012

Το θαλάσσιο εμπόριο έχει αυξηθεί την εικοσαετή περίοδο 1986-2006 ακολουθώντας την πορεία της παγκόσμιας οικονομίας (ISL Shipping Statistics Yearbook 2007). Η συνολική μέση ετήσια αύξηση τονομιλίων τη συγκεκριμένη περίοδο άγγιξε το 4.1%, ενώ η παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη, που εκφράζεται με το ποσοστό ανόδου του ΑΕΠ, ήταν κατά μέσο όρο 3.4% ετησίως. Λόγω της στενής σύνδεσης της με το θαλάσσιο εμπόριο η διεθνής ναυτιλία διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διευκόλυνση των εμπορικών συναλλαγών, αφού το πλοίο αποτελεί το πιο οικονομικά αποδοτικό μέσο μεταφοράς για μεγάλου βάρους και μικρής αξίας φορτία.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερή η συμμετοχή της ναυτιλίας στην παγκόσμια οικονομία. Αναλυτικότερα, το 90% των κινήσεων του παγκοσμίου εμπορίου εκτελούνται μέσω των πλοίων. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (IPPC), τα πλοία ευθύνονται μόνο για το 3% των παγκόσμιων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και ακριβέστερα του CO<sub>2</sub>. Η υπερθέρμανση του πλανήτη όμως έχει αναχθεί σε μείζον θέμα και γίνονται ολοένα προσπάθειες να περιοριστούν οι ρύποι.

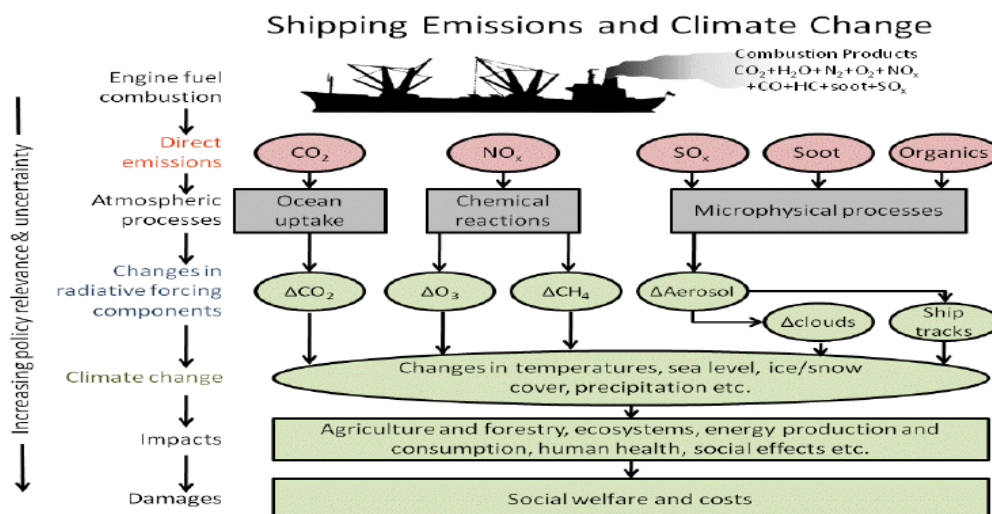
Αν και το ποσοστό της συνεισφοράς της ναυτικής βιομηχανίας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι σχετικά μικρό (σχήμα 1.2), ο στόχος είναι να μειωθεί η εκπομπή CO<sub>2</sub> κατά 50% μέσα στα επόμενα έτη.



Σχήμα 1.2: Συνεισφορά μεταφορών στην ατμοσφαιρική ρύπανση αναλογικά με το μεταφορικό τους έργο (gr/tn-km)

## 1.2 Πλαίσιο κανονισμών IMO

Υπό αυτό το πλαίσιο, ο Παγκόσμιος Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει δημιουργήσει μια σειρά κανονισμών μέσω της σύμβασης MARPOL και θέτει περιορισμούς στις εκπομπές των παραγόμενων αερίων. Όπως είναι γνωστό κατά τη χημική διεργασία της καύσης του πετρελαίου σε μια Μηχανή Εσωτερικής Καύσης, παράγονται διάφορα προϊόντα που θεωρούνται ρύποι.



Σχήμα 1.3: Εκπομπές που οφείλονται στην δραστηριότητα των πλοίων και συσχέτιση με την κλιματική αλλαγή (IMO 2009)



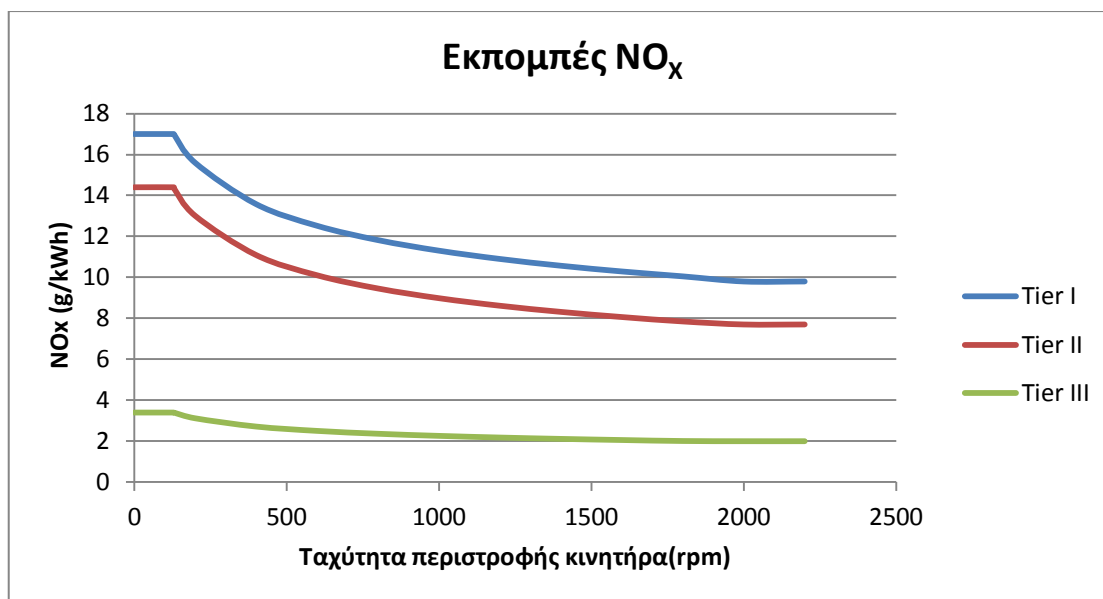
Αυτοί αναφέρονται στο διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, CO, στο διοξείδιο και τριοξείδιο του θείου SO<sub>2</sub>,SO<sub>3</sub>, στο μονοξείδιο και διοξείδιο του αζώτου NO, NO<sub>2</sub> και σε διάφορα άλλα σωματίδια.

Συγκεκριμένα στο παράρτημα VI της MARPOL τίθενται οι περιορισμοί για τις εκπομπές NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>. Η εισαγωγή του δείκτη ενεργειακής απόδοσης σχεδιασμού (EEDI) περιορίζει τις εκπομπές CO<sub>2</sub>

### 1.2.1 Πλαίσιο κανονισμών IMO για εκπομπές NO<sub>x</sub>

Τα όρια για εκπομπές NO<sub>x</sub> (Διάγραμμα 1.1) ορίζονται για κινητήρες Diesel και εξαρτώνται από το μέγιστο αριθμό στροφών λειτουργίας του κινητήρα. Οι κανονισμοί των Tier I και Tier II είναι παγκόσμιας εμβέλειας ενώ οι κανονισμοί του Tier III αφορούν μόνο τις περιοχές ελέγχου των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Συγκεκριμένα :

- Οι κανονισμοί για το Tier I τέθηκαν σε ισχύ το 2005 και εφαρμόζονται για όλες τις ναυτικές μηχανές diesel οι οποίες είναι εγκατεστημένες από 1/1/2000 και πριν την 1/1/2011. Οι επιτρεπόμενες εκπομπές οξειδίων είναι:
  - ✓ 17.0g/kWh όταν οι στροφές του κινητήρα  $n$  (RPM) είναι λιγότερες από 130rpm
  - ✓  $45 \times n^{-0.2}$  g/kWh όταν οι στροφές  $n$  είναι μεταξύ 130rpm και 2000rpm
  - ✓ 9.8g/kWh όταν η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι 2000rpm ή περισσότερο.
- Οι κανονισμοί για το Tier II τέθηκαν σε ισχύ την 1/1/2011 και αντικατέστησαν τους κανονισμούς για το Tier I όσο αφορά τις εκπομπές NO<sub>x</sub>. Εφαρμόζονται για μηχανές diesel σε πλοία που κατασκευάστηκαν μετά την 1/1/2011. Οι επιτρεπόμενες εκπομπές οξειδίων είναι:
  - ✓ 14.4g/kWh όταν οι στροφές του κινητήρα  $n$  (RPM) είναι λιγότερες από 130rpm
  - ✓  $44 \times n^{-0.23}$  g/kWh όταν οι στροφές  $n$  είναι μεταξύ 130rpm και 2000rpm
  - ✓ 7.7g/kWh όταν η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι 2000rpm ή περισσότερο.
- Η ημερομηνία εφαρμογής των κανονισμών του Tier III δεν έχει καθοριστεί ακόμα. Οι κανονισμοί θα εφαρμοστούν στις περιοχές ελεγχόμενων ρύπων (ECA), οι οποίες θα καθοριστούν από τον IMO. Μέχρι τώρα η περιοχή της βόρειας Αμερικής και η Καραϊβική έχουν οριστεί. Οι κανονισμοί του Tier III δεν θα εφαρμοστούν για πλοία μικρότερα των 24 μέτρων ή πλοία με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 750kW. Οι περιορισμοί σε NO<sub>x</sub> του Tier III αντιστοιχούν σε μείωση 80% σε σύγκριση με αυτούς του Tier I. Η μείωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός βοηθητικού συστήματος ελέγχου των εκπεμπόμενων ρύπων.
  - ✓ 3.4g/kWh όταν οι στροφές του κινητήρα  $n$  (RPM) είναι λιγότερες από 130rpm
  - ✓  $9 \times n^{-0.2}$  g/kWh όταν οι στροφές του κινητήρα  $n$  είναι μεταξύ 130rpm και 2000rpm
  - ✓ 2.0g/kWh όταν η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι 2000rpm ή περισσότερο.



Διάγραμμα 1.1: Επιτρεπόμενες εκπομπές NOx κατά IMO

### 1.2.2 Πλαίσιο κανονισμών IMO για εκπομπές SOx

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του παραρτήματος VI της MARPOL έχει τεθεί ένα μέγιστο όριο παγκοσμίως στην περιεκτικότητα σε θείο για κάθε καύσιμο. Επιπλέον περιλαμβάνονται αυστηρότερες διατάξεις που αφορούν συγκεκριμένες περιοχές ελεγχόμενων ρύπων (SECA). Αυτή τη στιγμή οι υπάρχουσες περιοχές SECA είναι η Βαλτική θάλασσα, η Βόρεια θάλασσα, η Καραϊβική και η περιοχή 200 ναυτικών μιλίων μακριά από τις ακτές της Βόρεια Αμερική.

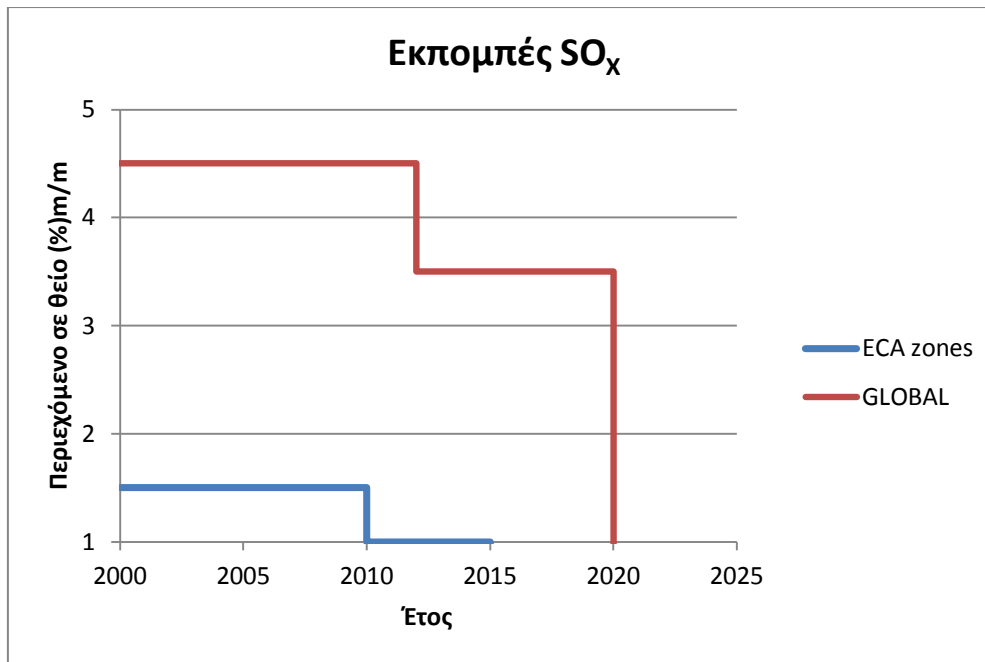
Τα όρια περιεκτικότητας σε θείο και οι ημερομηνίες εφαρμογής αναφέρονται παρακάτω και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 1.2.

Σε παγκόσμιο κλίμακα:

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

Σε περιοχές ελέγχου εκπομπών SOx:

- ✓ 1.5% από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2012
- ✓ 0.1% από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020



Διάγραμμα 1.2: Επιτρεπόμενες εκπομπές SO<sub>x</sub> κατά IMO

### 1.3 Τρόποι Περιορισμού Εκπομπών SO<sub>x</sub>

Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να περιοριστούν οι εκπεμπόμενοι ρύποι SO<sub>x</sub>

- Συστήματα Scrubbers
- Χρήση κατάλληλου καυσίμου
- Μετασκευή για κατανάλωση καυσίμου LNG

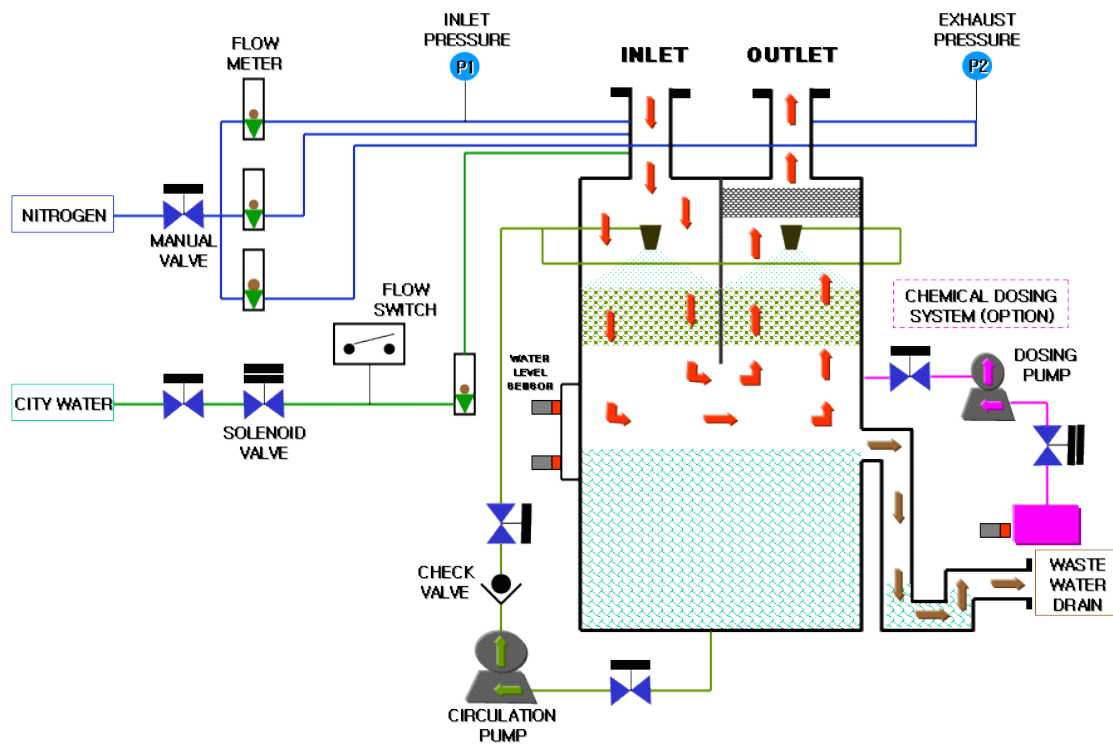
#### 1.3.1 Συστήματα Scrubbers

Το Scrubber είναι ένα σύστημα ελέγχου της ρύπανσης του αέρα, το οποίο μπορεί να αφαιρεί σωματίδια ή αέρια με χημικό ή φυσικό τρόπο. Το πρώτο σύστημα Scrubber κατασκευάστηκε για να αφαιρεί το CO<sub>2</sub> από τα αέρια ενός υποβρυχίου. Αρχικά χρησιμοποιούνταν για να αφαιρεθούν τα ανεπιθύμητα αέρια από τα καυσαέρια όμως πλέον χρησιμοποιείται για τον ψεκασμό ενός στερεού ή ενός μεγάλης πυκνότητας υγρού, το οποίο αντιδρά ώστε να αφαιρεθούν οι τοξικές ουσίες.

Ένα μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι μέσω αυτής της διεργασίας, απομακρύνονται κάποιες ανεπιθύμητες ουσίες, εν προκειμένω τα SO<sub>x</sub>, υπό την μορφή υγρών ή εξαιρετικά παχύρευστων υποπροϊόντων ή σε μορφή σκόνης. Αυτά στη συνέχεια οφείλουν να απομακρυνθούν με ασφάλεια εφόσον δεν χρησιμοποιηθούν. Επίσης από τα συστήματα αυτά που είναι κακώς συντηρημένα, ενδέχεται να εξαπλωθούν βακτήρια που επιδρούν στην υγεία του προσωπικού.

Τα συστήματα Scrubbers χωρίζονται στα Wet και στα Dry Scrubbers. Τα πρώτα χρησιμοποιούν υγρό το οποίο ψεκάζεται στα καυσαέρια και απομακρύνουν τα σωματίδια από τα καυσαέρια. Είναι δε δυνατό να φτάσουν σε μείωση των οξειδίων του θείου κατά 99% σε

πρόσφατες υλοποιήσεις. Από την άλλη στα Dry Scrubbers, σωματίδια αλκαλικού απορροφητικού υγρού εισάγονται στα καυσαέρια και παράγεται ένα στερεό προϊόν. Αυτή η διαδικασία λέγεται και Flue Gas Desulfurization (FGD). Η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να φτάσει στο 95% σε πρόσφατες υλοποιήσεις. Στην ναυτιλία χρησιμοποιούνται τα Wet Scrubbers και χωρίζονται σε συστήματα ανοικτού κύκλου, κλειστού κύκλου και στα υβριδικά.



Σχήμα 1.4: Αρχή λειτουργίας Wet Scrubber  
 Πηγή: Crystec Technology Trading GmbH

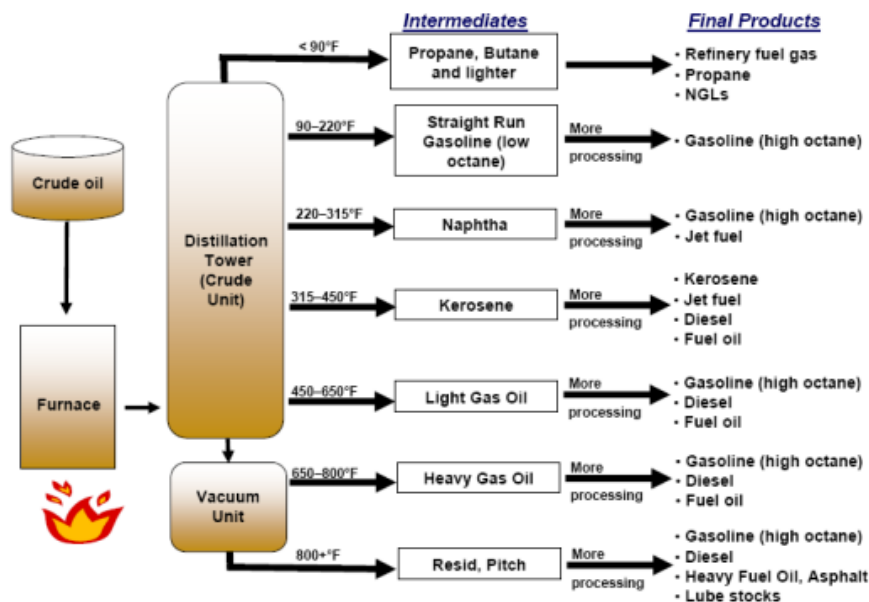
Τα συστήματα ανοικτού κύκλου χρησιμοποιούν αποκλειστικά θαλασσινό νερό για τον καθαρισμό των καυσαερίων και λέγονται ανοικτού κύκλου, καθώς το νερό απορροφάται από την θάλασσα και διοχετεύεται και πάλι σε αυτήν αφού χρησιμοποιηθεί και επεξεργασθεί. Η διεργασία στηρίζεται στην αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού που διευκολύνει τον καθαρισμό των οξειδίων του θείου.

Τα συστήματα κλειστού κύκλου χρησιμοποιούν γλυκό νερό, στο οποίο γίνεται κατάλληλη χημική επεξεργασία ώστε να καθαριστούν τα καυσαέρια. Λέγονται κλειστού κύκλου διότι το μέσο καθαρισμού επανακυκλοφορεί στο σύστημα χωρίς πρόσληψη νερού.

Το υβριδικό σύστημα αποτελεί μίξη του ανοικτού και κλειστού κύκλου και προσεγγίζει πιο πολύ το σύστημα κλειστού κύκλου σε πρώτη όψη. Όμως περιλαμβάνει πρόσθετα μέρη που του επιτρέπουν να λειτουργεί και ως ανοικτού κύκλου. Η ιδέα στην οποία βασίζεται είναι: λειτουργεί εν πλω ως ανοικτού τύπου και αποφεύγει κατά αυτόν τον τρόπο τη χρήση χημικού παράγοντα και ως κλειστού τύπου όταν βρίσκεται στο λιμάνι και κατά συνέπεια αποφεύγεται η αποβολή των λυμάτων σύμφωνα με τους κανονισμούς.

### 1.3.2 Χρήση πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο

Η αρχή της μηχανής πετρελαίου ήταν το 1892 από τον Rudolf Diesel, ενώ δώδεκα χρόνια αργότερα κατασκευάστηκε και η πρώτη τετράχρονη diesel μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την πρόωση πλοίου. Αργότερα, το 1930 άρχισαν να κατασκευάζονται δίχρονες μηχανές diesel, μεγαλύτερες και με πολύ καλύτερη απόδοση. Το 1950 μια σειρά καινοτομιών που εφαρμόστηκαν, επέτρεψε τη χρήση βαρέως πετρελαίου (heavy fuel oil) σε ναυτικούς κινητήρες (M/V “Princess of Vancouver”), καθώς χρησιμοποιήθηκαν λιπαντικά ιδιαίτερα αλκαλικά, ικανά να ουδετεροποιήσουν τα οξέα που παράγονταν κατά την καύση καυσίμων με υψηλό αριθμό θείου (residual fuels). Σήμερα το μεγαλύτερο ποσοστό του παγκοσμίου στόλου της εμπορικής ναυτιλίας κινείται με heavy fuel oil. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζονται τα προϊόντα του πετρελαίου.



Σχήμα 1.5:Κλασματική απόσταξη αργού πετρελαίου

Πιο αναλυτικά τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα από αυτού του τύπου μηχανές τόσο στην ναυτιλία όσο και στην ηλεκτροπαραγωγή είναι τα εξής :

**Diesel Oil (distillate oil).** Το καύσιμο Diesel είναι ένα μείγμα υδρογονανθράκων που προέρχεται από την απόσταξη του αργού πετρελαίου. Το Diesel Oil αποτελεί το παραδοσιακό καύσιμο των κινητήρων Diesel. Για την χρήση του, δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία, διαχωρισμός ή προθέρμανση πριν την καύση, αν και οι ιδιότητές του βελτιώνονται με την προσθήκη ουσιών με σκοπό την καλύτερη απόδοση του κινητήρα. Είναι το βασικό καύσιμο των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα των μικρότερων μονάδων και των ναυτικών κινητήρων. Αύξηση της τιμής του έχουν προκαλέσει τα νέα όρια εκπομπών οξειδίων του θείου που επιβάλλουν στα διυλιστήρια περαιτέρω επεξεργασία του καυσίμου, ώστε να μειώνεται το ποσοστό θείου σε αυτό.

**Heavy Fuel Oils (HFO).** Τα καύσιμα αυτά αποτελούν τα κατάλοιπα της διύλισης του αργού πετρελαίου, η ποιότητα των οποίων ποικίλει ανάλογα με την διαδικασία διύλισης που

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ακολουθείται και την σύνθεση του ακατέργαστου πετρελαίου που χρησιμοποιείται. Τα καύσιμα HFO έχουν μεγάλο ιξώδες και υψηλό ποσοστό θείου. Εξαιτίας του μεγάλου ιξώδες τους απαιτούν προθέρμανση πριν την εισαγωγή τους στον θάλαμο καύσης, καθώς επίσης την διατήρηση συγκεκριμένης θερμοκρασίας κατά την αποθήκευση τους. Αξιοσημείωτη είναι και η ύπαρξη HFO χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Οι διαφορές ανάμεσα στο H.F.O. και στο H.F.O. που έχει υποστεί επεξεργασία για την μείωση του ποσοστού θείου παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1:

	ΜΑΖΟΥΤ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΙΟ	ΜΑΖΟΥΤ ΥΨΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΙΟ
Παράμετροι	Όρια	Όρια
Μέγιστη πυκνότητα στους 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	970-980	980-991
Ελάχιστο σημείο ανάφλεξης	66	66
Ιξώδες στους 50°C ,cSt ελάχιστο-μέγιστο	180-380	180-380
Ανθρακούχο υπόλειμμα (%m/m)	15	15-17
Μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό (%m/m)	0.5	0.5
Μέγιστη περιεκτικότητα σε τέφρα %m/m	0.10	0.10-0.15
Μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο (%m/m)	0.7	3.2
Μέγιστη περιεκτικότητα σε βανάδιο (%m/m)	120-150	220-250
Μέγιστη περιεκτικότητα σε νάτριο (%m/m)	100	100-150
Μέγιστη περιεκτικότητα σε ολικό ίζημα (%m/m)	0.15	0.15

**Πίνακας 1.1:** Σύγκριση H.F.O. και H.F.O. low sulphur

Πηγή: ISO(2005), Specification of marine fuels

**Emulsified Fuels** (γαλακτοποιημένα καύσιμα). Αποτελούν βαριά κλάσματα υδρογονανθράκων και προέρχονται είτε από φυσικές πηγές με την μορφή της πίσσας, είτε είναι προϊόντα διύλισης, τα οποία υφίστανται επεξεργασία με νερό ώστε να ομογενοποιηθούν. Χρησιμοποιούνται από τους ίδιους κινητήρες που χρησιμοποιούν καύσιμα HFO.

**Crude Oil.** Πρόκειται για το αργό αδιύλιστο πετρέλαιο, η ποιότητα του οποίου εξαρτάται από την πετρελαιοπηγή και την τοποθεσία της.

**Μαζούτ.** Ο όρος μαζούτ αναφέρεται γενικότερα στα κατάλοιπα της απόσταξης του αργού πετρελαίου (HFO, Heavy residues, Crude Oil). Γενικά, το μαζούτ είναι παχύρευστο σε συνθήκες συνθήκες θερμοκρασίας. Χρησιμοποιείται σαν καύσιμο σε μεγάλες εγκαταστάσεις

παραγωγής ατμού ή ηλεκτρισμού και για την κίνηση πλοίων. Τα μαζούτ είναι τα προϊόντα του διυλιστηρίου με τη χαμηλότερη τιμή πώλησης, χαρακτηριστικό που μειώνει το λειτουργικό κόστος των μεγάλων, δίχρονων μηχανών Diesel, δίνοντας τους σημαντικό πλεονέκτημα στον τομέα της ναυτιλίας και της ηλεκτροπαραγωγής.

**Residual Oil (RO).** Αποτελεί το βαρύτερο κλάσμα της απόσταξης του αργού πετρελαίου και εξαιτίας του μεγάλου ιξώδους του απαιτεί προθέρμανση πριν την εισαγωγή του στον θάλαμο καύσης ώστε να είναι δυνατή η σωστή ροή του. Τείνει να έχει υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων, μεταξύ αυτών και θείου και είναι το πιο φθηνό υγρό καύσιμο στην αγορά. Ουσιαστικά, ταυτίζεται με την κατηγορία καυσίμων HFO.

**Intermediate Fuel Oil (IFO).** Το καύσιμο αυτό αποτελεί μείγμα 2% Diesel Oil και 98% HFO και ονομάζεται IFO380 ή μείγμα 12% Diesel και 88% HFO και ονομάζεται IFO180. Το IFO180 είναι πιο ακριβό από το IFO380 καθώς περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό Diesel Oil.

**Marine Diesel Oil (MDO).** Αποτελούνται κυρίως από Diesel Oil και περιέχουν χαμηλό ποσοστό θείου. Το MDO έχει μικρότερο ποσοστό θείου από τα IFO 180, IFO 380 και RO αλλά μεγαλύτερο από τα MGO.

**Marine Gas Oil (MGO).** Αποτελείται ουσιαστικά από Diesel Oil και έχει το χαμηλότερο ποσοστό θείου.

**Liquified Natural Gas (LNG).** Αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και ένα πολύ μικρό ποσοστό σε αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο. Βρίσκεται σε υγρή μορφή για λόγους ευκολίας για την αποθήκευση και τη μεταφορά του. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο καταλαμβάνει περίπου το 1/600 του όγκου του φυσικού αερίου σε αέρια κατάσταση.

## 1.4 Υγροποιημένο Φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο είναι ένα αέριο μίγμα υδρογονανθράκων. Εξάγεται από υπόγειες κοιλάτητες και εξαιτίας των ιδιοτήτων του θεωρείται οικολογικό καύσιμο. Βασικό συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο, συνυπάρχουν όμως σε αυτό και σημαντικές ποσότητες αιθανίου, προπανίου και βουτανίου, καθώς και διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο, ήλιο και υδρόθειο (πίνακας 1.2). Το φυσικό αέριο που είναι απαλλαγμένο από τους υδρογονάνθρακες πέραν του μεθανίου, δηλαδή το καθαρό μεθάνιο, συχνά αποκαλείται και ξηρό φυσικό αέριο.

COMPONENT	PRODUCTION AREA							
	ABU DHABI	ALASKA	ALGERIA	BRUNEI	IRAN	LYBIA	NORTH SEA	NW SHELF
Methane	90.37%	99.5%	86.30%	88.00%	96.30%	66.80%	85.90%	89.90%
Ethane	7.01%	0.10%	7.80%	5.10%	1.20%	19.40%	8.10%	6.70%
Propane	1.32%		3.20%	4.80%	0.40%	9.10%	2.70%	2.30%
Butane	0.55%		0.60%	1.80%	0.20%	3.50%	0.90%	1.00%
Pentane			0.10%	0.20%	0.10%	1.20%	0.30%	0.04%
Nitrogen	0.75%	0.40%		0.10%	1.30%		0.50%	0.08%
CO <sub>2</sub>							1.00%	

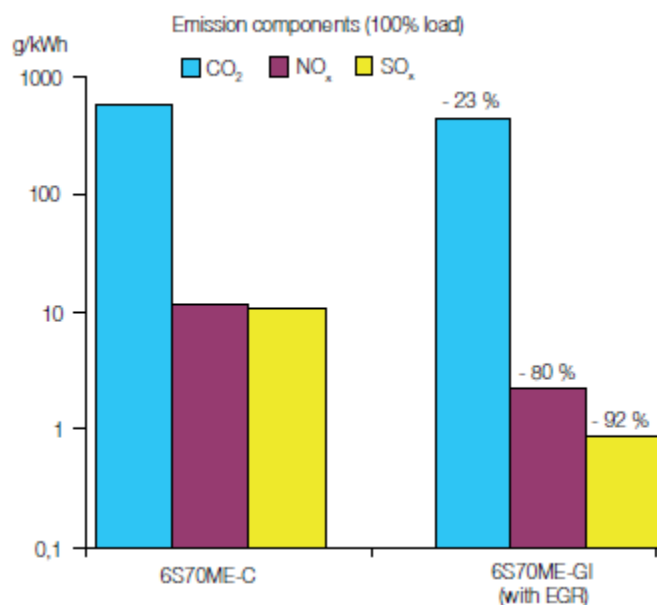
Πίνακας 1.2: Σύσταση φυσικού αερίου

Πηγή: ABS Gas carrier

Η υγρή του μορφή καταλαμβάνει 600 φορές μικρότερο όγκο σε σχέση με την αέρια. Η θερμογόνος δύναμη ή ενεργειακή πυκνότητα του εξαρτάται από την πηγή που προέρχεται και

ην διαδικασία υγροποίησης. Η ανώτερη θερμογόνο δύναμη του εκτιμάται στα 24 MJ/l, ενώ η κατώτερη στα 21MJ/l. Η πυκνότητα του LNG κυμαίνεται μεταξύ 0.41-0.5 kg/l και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και την σύνθεσή του.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά έναντι του πετρελαίου, βρίσκεται στους περιορισμένους ρύπους που εκλύονται κατά την καύση του (σχήμα 1.6).



**Σχήμα1.6:** Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων Dual Fuel μηχανής που καίει αριστερά μόνο HFO και δεξιά LNG (MAN)

Επειδή το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) ως καύσιμο έχει την ιδιότητα να μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) περίπου 25-30%, τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) σχεδόν στο μηδέν και τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) περισσότερο από 80%, είναι φανερό ότι εμφανίζει περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με οποιοδήποτε ορυκτό καύσιμο. Συνεπώς είναι εξαιρετικά ενδιαφέρον να εξετασθούν οι απαιτήσεις χρήσης του LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο πρόωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο.

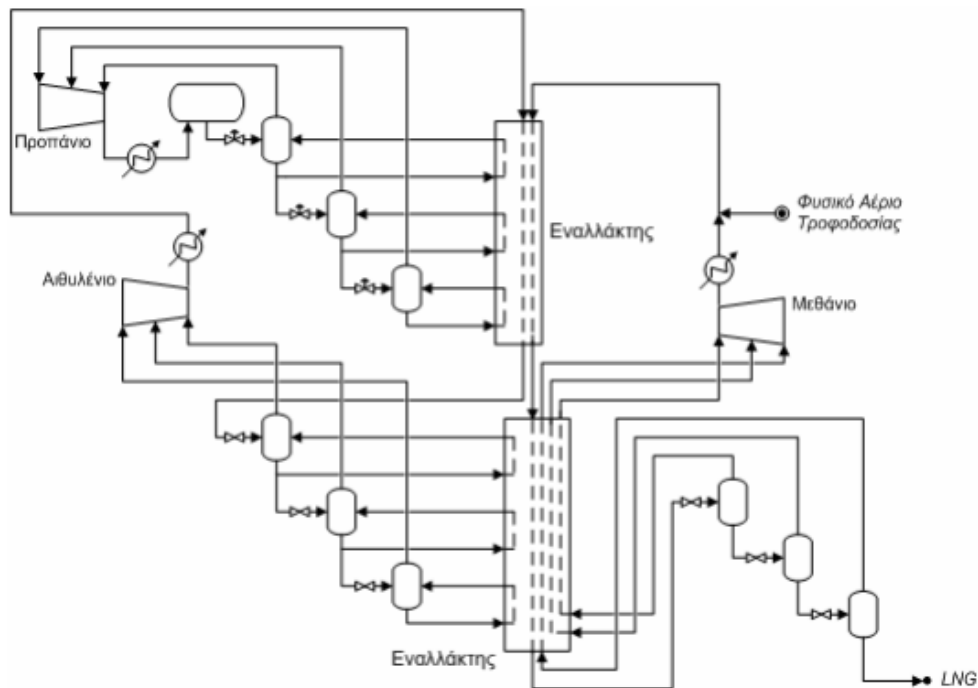
#### 1.4.1 Διαδικασίες Υγροποίησης

Η υγροποίηση φυσικού αερίου σε βάση φόρτωσης μεγάλου μεγέθους πραγματοποιείται με έμφαση στην απόδοση της διεργασίας. Η κλίμακα των λειτουργιών σημαίνει ότι η παραγωγή με την πιο μικρή εγκατεστημένη δυναμικότητα και την πιο μικρή κατανάλωση καυσίμων είναι η οικονομικά συμφέρουσα. Επειδή η θερμότητα που πρέπει να αφαιρεθεί από το φυσικό αέριο για να το ψύξει σε -160°C απορρίπτεται τελικά στον αέρα ή το νερό, έχουν αναπτυχθεί αρκετά περίπλοκα συστήματα.

**Διεργασίες Ψύξης σε Σειρά.** Οι πρώτες διεργασίες υγροποίησης φυσικού αερίου χρησιμοποιούσαν συστοιχίες απλών ψυκτικών μονάδων σε σειρά. Κάθε ψυκτικό χρησιμοποιείται σε ξεχωριστό κλειστό κύκλο που παρέχει ψύξη σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές περιοχές. Τυπικά, χρησιμοποιούνται προπάνιο, αιθυλένιο και μεθάνιο για να



παρέχουν μια ευρεία, ισορροπημένη σειρά ψύξης. Μετά από τη συμπίεση, τρία επίπεδα θερμοκρασιών για καθένα από τα τρία επίπεδα θερμοκρασίας αντιστοιχεί σε μία προκαθορισμένη ελάττωση πίεσης (στα δοχεία διαχωρισμού) για την εξάτμιση του ψυκτικού σε εναλλαγή θερμότητας με την τροφοδοσία φυσικού αερίου και ένα ξεχωριστό ρεύμα ψυκτικού που απαιτεί ψύξη. Με αυτόν τον τρόπο, αφαιρείται θερμότητα από το φυσικό αέριο σε διαδοχικά χαμηλότερες θερμοκρασίες δηλαδή, το ψυκτικό βράζει σε διαδοχικά χαμηλότερη πίεση. Η θερμότητα απορρίπτεται στον αέρα ή σε νερό μέσω του θερμότερου ψυκτικού, συνήθως προπανίου και των μεταψυκτών των συμπιεστών. Ο κύκλος ψύξης του μεθανίου είναι ανοικτός δεδομένου ότι συνδυάζεται με την τροφοδοσία φυσικού αερίου και μετά από το τελικό στάδιο ελάττωσης πίεσης το υγρό μεθάνιο αποτελεί το μέρος του παραγόμενου LNG. Οι διεργασίες ψύξης σε σειρά επέτρεψαν τη χρήση ψυκτικών συστημάτων ενός συστατικού σε εποχές που δεν είχαν αναπτυχθεί τόσο καλά οι θερμοδυναμικοί συσχετισμοί και οι βάσεις δεδομένων θερμοφυσικών ιδιοτήτων τόσο όσο είναι αυτή η στιγμή. Επιπλέον, οι διεργασίες μπόρεσαν να γίνουν πολύ αποδοτικές (δηλαδή μειώθηκε το ποσοστό αναντιστρεπτότητας) με την αύξηση τόσο του αριθμού των ψυκτικών ουσιών που χρησιμοποιήθηκαν όσο και των βαθμίδων εξάτμισης του κάθε ψυκτικού. Όμως, αυτή η βελτίωση στην απόδοση, εντούτοις, είχε αυξημένες οικονομικές συνέπειες. Κάθε ψυκτικό απαιτεί συμπιεστή, μηχανισμό κίνησης, δοχεία και εναλλάκτες θερμότητας, μαζί με τις απαραίτητες σωληνώσεις, μόνωση, και συστήματα ελέγχου. Κάθε πρόσθετο στάδιο εξάτμισης προσθέτει στον αριθμό των εναλλακτών θερμότητας και δοχείων και στον αριθμό των παράπλευρων ρευμάτων που εισάγονται στο συμπιεστή.



Σχήμα 1.7: Διεργασία υγροποίησης εννέα βαθμίδων σε σειρά

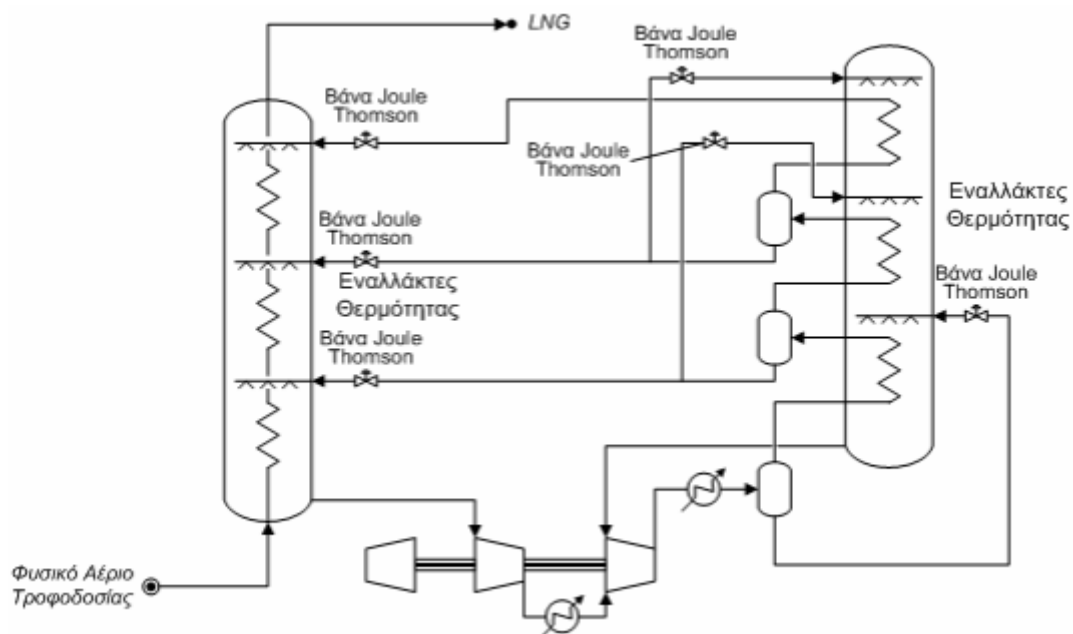
Πηγή: <http://www.chemeng.ntua.gr/courses>

**Διεργασίες με μείγμα ψυκτικών.** Το πρόβλημα του σύνθετου σχεδιασμού, το σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης και οι περιορισμοί στα ενδιάμεσα στάδια της διαδικασίας υγροποίησης σε σειρά αντιμετωπίζονται με τις διεργασίες υγροποίησης με μίγμα ψυκτικών. Με την εξέλιξη του εξοπλισμού και των συστημάτων ελέγχου έγινε δυνατός ο συνδυασμός ψυκτικών σε έναν ψυκτικό κύκλο.

Σε τέτοιες διεργασίες, γίνεται συνδυασμός ψυκτικών όπως πεντάνιο, βουτάνιο, προπάνιο, αιθάνιο, μεθάνιο και άζωτο σε αναλογίες κατάλληλες για την καμπύλη ψύξης του προς υγροποίηση φυσικού αερίου. Η καμπύλη θερμοκρασίας –ενθαλπίας θέρμανσης του μίγματος ψυκτικών ,δηλαδή, ακολουθεί πολύ κοντά την καμπύλη ψύξης του φυσικού αερίου.

Αυτό μειώνει την αναντιστρεπτότητα της διεργασίας. Το μείγμα ψυκτικών συμπυκνώνεται έπειτα, κατά ένα μέρος με αέρα ή νερό και το υπόλοιπο σε χαμηλότερη θερμοκρασία με εναλλαγή θερμότητας με το ίδιο μείγμα. Στην τελευταία περίπτωση, το εισερχόμενο αέριο ψύχεται και συμπυκνώνεται σε υψηλότερη πίεση κατ’ αντιρροή με την εξατμιζόμενη υγρή φάση του μίγματος ψυκτικών, καθένα από τα οποία εκτονώνεται σε μια πολύ χαμηλότερη πίεση και, ως εκ τούτου, και θερμοκρασία.

Η διεργασία με μίγμα ψυκτικών έχει αποδώσει καλά σε διάφορες εγκαταστάσεις και αντιπροσωπεύει μια απλοποίηση έναντι της διαδικασίας υγροποίησης σε σειρά. Εντούτοις, δεν είναι θερμοδυναμικά αρκετά αποδοτική ώστε να είναι οικονομική σε σχέση με τις αυξανόμενες τιμές ενέργειας..

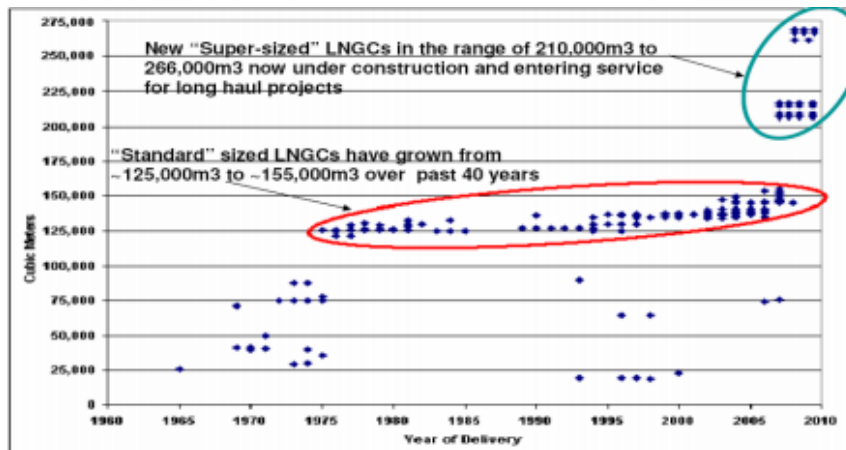


Σχήμα 1.8: Διεργασία υγροποίησης με μίγμα ψυκτικών  
 Πηγή: <http://www.chemeng.ntua.gr/courses>

**Διεργασίες με Μίγμα Ψυκτικών και Προκαταρκτική Ψύξη.** Στις αρχές της δεκαετίας του '70, αναπτύχθηκε μια Τρίτη γενιά διεργασιών, με μίγμα ψυκτικών και προκαταρκτική ψύξη, από τον άμεσο συνδυασμό των άλλων δύο. Η ευρύτατα χρησιμοποιούμενη διεργασία χρησιμοποιεί δύο χωριστά συστήματα ψύξης, έναν κύκλο ψύξης με προπάνιο σε σειρά, ακολουθούμενη από έναν κύκλο με μίγμα ψυκτικών που περιλαμβάνει προπάνιο, αιθάνιο, μεθάνιο και άζωτο ως συστατικά. Ο κύκλος προπανίου προψύχει το φυσικό αέριο. Το τμήμα ψύξης με προπάνιο μπορεί να κατασκευαστεί από κοινό χάλυβα χαμηλότερου κόστους, ενώ τα τμήματα χαμηλότερης θερμοκρασίας απαιτούν χάλυβες αργιλίου ή νικελίου. Κατά συνέπεια, ο διαχωρισμός της διεργασίας ψύξης στο στάδιο του προπανίου είναι συμβατός με την επιλογή οικονομικών υλικών. Τέλος, με την μείωση του εύρους της ψύξης που πρέπει να επιτευχθεί από το μίγμα ψυκτικών ουσιών μπορεί να βελτιστοποιηθεί η σύνθεση του και να μειωθούν σημαντικά οι ενεργειακές απώλειες.

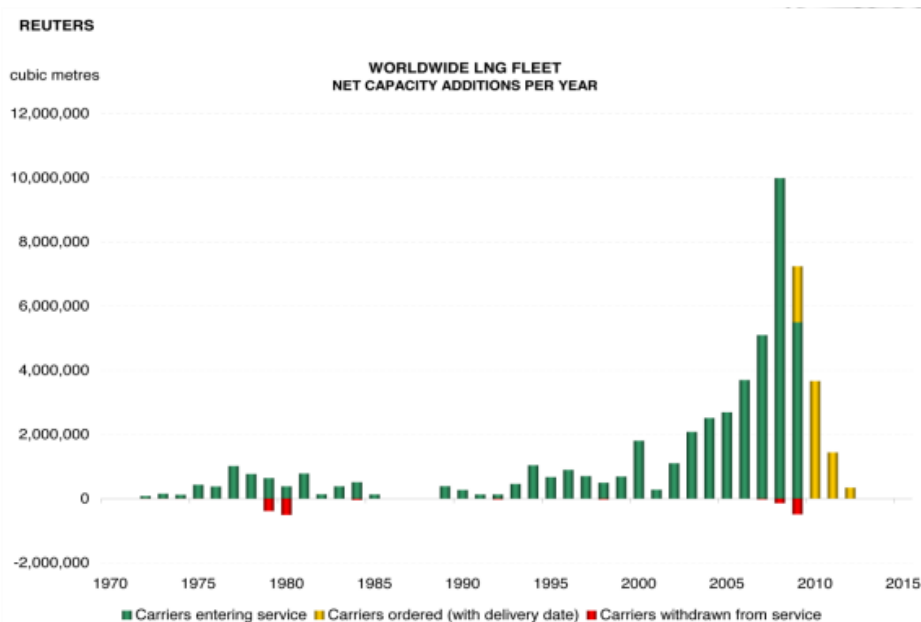
### 1.4.2 LNG carriers συμμετοχή στην παγκόσμια οικονομία

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στην ναυπήγηση των LNG πλοίων αφορούν κυρίως τα συστήματα των δεξαμενών που φυλάσσεται το φορτίο, τη διαδικασία επαναυδροποίησης πάνω στο πλοίο και τις εναλλακτικές μονάδες πρόωσης. Είναι γεγονός πως μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του 1990, η ναυπήγηση των LNG πλοίων κυριαρχούσε στην Ευρώπη και στις Η.Π.Α. ωστόσο, σήμερα τα Ασιατικά ναυπηγεία έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 70% των παραγγελιών δίνεται σε ναυπηγεία της Νότιας Κορέας ενώ τα ναυπηγεία στην Κίνα συμμετέχουν με ποσοστό ναυπήγησης 25% του νεότευκτου στόλου.



**Σχήμα 1.9:** Αναπαράσταση αύξησης της χωρητικότητας LNG carriers  
Πηγή: A short history of LNG Shipping 1959-2009, Sname, February 2009

Συμβαδίζοντας με την ανοδική πορεία του κλάδου τα τελευταία χρόνια, είναι γεγονός πως ο στόλος των LNG πλοίων έχει αυξηθεί σημαντικά. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό αύξησης των πλοίων σε παγκόσμια κλίμακα ισοδυναμεί με ποσοστό 70% για την περίοδο 1999 ως 2005 ενώ το ποσοστό αυτό έχει αυξηθεί σήμερα. Οι εξελίξεις ήταν σημαντικές καθώς μόλις πριν λίγα χρόνια, το μέσο μέγεθος ενός LNG πλοίου ήταν μεταξύ 125,000-130,000 m<sup>3</sup> ενώ στα σημερινά δεδομένα, ένα μέσο μέγεθος της εν λόγω κατηγορίας πλοίου είναι 150,000 m<sup>3</sup>. Βέβαια, σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι για πολύ μεγάλης χωρητικότητας πλοία (>250,000 m<sup>3</sup>), υπάρχουν δυσκολίες ως προς την εξυπηρέτησή τους στα τερματικά στην Ευρώπη και έτσι επενδύσεις σε τέτοιας τάξης χωρητικότητας ενδεχομένως να υποθάλπει περιορισμούς σε συγκεκριμένες αγορές. Στο σχήμα 1.10 παρουσιάζεται ο στόλος σε πλοία μεταφοράς υδροποιημένου φυσικού αερίου μέχρι το 2013.



Σχήμα 1.10: Ο στόλος LNG σε παγκόσμιο επίπεδο  
 Πηγή: ([www.shipbuildinghistory.com](http://www.shipbuildinghistory.com))

### 1.4.3 Κίνητρα ανάπτυξης, χαρακτηριστικά και εξελίξεις της διεθνούς αγοράς LNG

Η μείωση του όγκου του Φυσικού Αερίου, όπως προαναφέρθηκε, με την υγροποίησή του, επιτρέπει την μεταφορά του με οικονομικά ανταγωνιστικούς όρους σε σχέση με τους αγωγούς. Ειδικότερα για μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις (πάνω από 3.000 μίλια), το LNG είναι κατά κανόνα οικονομικά συμφέρουσα επιλογή. Επιπλέον, το LNG επιτρέπει την ανάπτυξη εμπορίου μεταξύ περιοχών που διαφορετικά θα ήταν τεχνικά ή πολιτικά αδύνατο να συνδεθούν. Στους ειδικότερους λόγους που ευνόησαν την ανάπτυξη της διεθνούς αγοράς LNG περιλαμβάνεται η στροφή στο Φυσικό Αέριο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των περιβαλλοντικών και οικονομικών πλεονεκτημάτων του. Ειδικότερα στην μεταφορά του ως LNG επιτεύχθηκε μείωση κόστους σε όλα τα στάδια της εφοδιαστικής του αλυσίδας με διάφορες τεχνολογικές βελτιώσεις. Επιπλέον, οι όροι των συμβολαίων άρχισαν να γίνονται πιο ελαστικοί μπροστά στην ανάγκη για μεγαλύτερη ευελιξία για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης. Σταδιακά ένα μέρος της αγοράς άρχισε να κινείται ανταγωνιστικά και να υπόσχεται ευκαιρίες για αυξανόμενα κέρδη. Τέλος, το LNG εξυπηρετεί την απαίτηση των χωρών για ασφάλεια στην ενεργειακή τους τροφοδοσία μέσω της διαφοροποίησης των ενεργειακών τους πηγών.

### 1.5 Ενεργειακός δείκτης EEDI

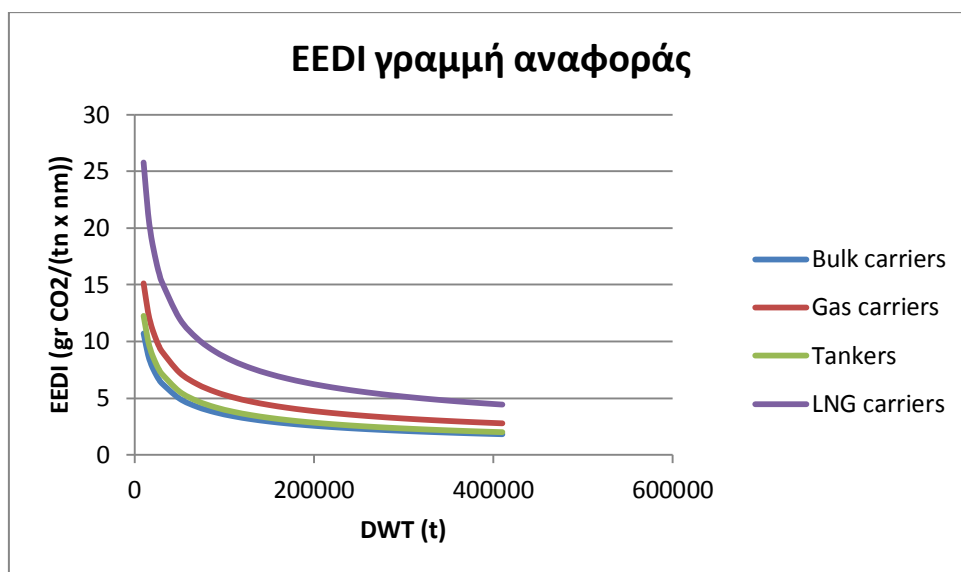
Όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου αυτού, η προσπάθεια της μείωσης των εκπεμπόμενων αερίων, η ελάττωση των SOx, η χρήση πιο πράσινων καυσίμων όπως το φυσικό αέριο, έχει οδηγήσει στην εισαγωγή των ενεργειακών δεικτών EEDI (Energy Efficiency Design Index)-EEOI (Energy Efficiency Operational Index). Ο δείκτης EEDI αποτελεί ένα μαθηματικό τύπο που εκφράζει την αναλογία μεταξύ των ρύπων που εκλύονται για την παραγωγή ενός έργου (μεταφορά φορτίου) προς αυτό το έργο (σχήμα 1.11).

$$EEDI = \frac{\text{CO}_2 \text{ emissions}}{\text{Transport work}}$$

Σχήμα 1.11: Αναπαράσταση της θεμελιώδους αρχής του EEDI

Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θεωρούνται ότι προέρχονται από τις κύριες και βοηθητικές μηχανές μετά την αφαίρεση των εκπομπών που αναλογούν στην ισχύ που προσφέρεται από τη χρήση αντίστοιχων καινοτόμων τεχνολογιών. Το κέρδος που παράγεται θεωρείται ότι αποτελείται από το μεταφερόμενο φορτίο επί την ταχύτητα του πλοίου. Οι μονάδες του EEDI είναι ‘γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά χωρητικότητα-μίλι’, όπου χωρητικότητα είναι η μεταφορική ικανότητα του φορτίου. Κατά κύριο λόγο η μεταφορική ικανότητα αντιστοιχεί στο πρόσθετο βάρος (deadweight)

Ο πρωταρχικός σκοπός του EEDI είναι να μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> από τη ναυτιλία, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των νέων κατασκευών. Για το σκοπό αυτό ο EEDI υπολογίζεται για τα νέα πλοία, τα οποία είναι εξαναγκασμένα να έχουν EEDI μικρότερο, κατά ένα ποσοστό μείωσης, από μια γραμμή αναφοράς (baseline), η οποία αντιπροσωπεύει την μέση αποδοτικότητα για πλοία χτισμένα μεταξύ 1999 και 2009. Η βασική ιδέα είναι ότι η τιμή του EEDI ενός νέου πλοίου πρέπει να είναι ίση ή μικρότερη από την απαιτούμενη τιμή (τιμή στόχο) του EEDI. Με βάση τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου, η ενεργειακή απόδοση του πλοίου θα μετράται με το ποσοστό μείωσης που μπορεί να επιτευχθεί από την γραμμή αναφοράς



Διάγραμμα 1.3: Απαιτούμενη τιμή EEDI μέχρι 31/12/2019 για διάφορους τύπους πλοίων

### 1.5.1 Ορισμός του δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI)

Όπως έχει αναφερθεί ο Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας είναι ένα μέτρο της αποδοτικότητας της σχεδίασης ενός νέου πλοίου σε σχέση με τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Εκφράζει κατά κάποιο τρόπο το περιβαλλοντικό κόστος σε σχέση με το όφελος. Οι συζητήσεις για την μορφή του δείκτη ξεκίνησαν τον Απρίλη 2008 MEPC 57 όταν προτάθηκε και η αρχική του μορφή από την Ιαπωνία. Μεσολάβησε ένας χρόνος για να πάρει την μορφή που έχει μέχρι σήμερα ενώ ακόμα γίνονται συζητήσεις για την βελτίωση του.

Στη σύνοδο του Ιουλίου 2009 MEPC-59 ο EEDI έλαβε την σημερινή του μορφή :

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

Ακολουθεί επεξήγηση των συμβόλων:

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

Αναφέρεται στην ισχύ (σε kW) των κύριων ή βοηθητικών μηχανών,

- ME: κύρια μηχανή
- AE: Βοηθητικές μηχανές

#### P<sub>ME</sub> (ισχύς της κύριας μηχανής)

P<sub>ME</sub> : αναφέρεται ως το 75% της εγκατεστημένης ονομαστικής Ισχύος (MCR) για κάθε κύρια μηχανή αφού αφαιρεθούν τυχόν ροές σε εγκατεστημένες γεννήτριες άξονα.

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

$$P_{ME} = 0.75 \cdot (MCR_{ME(i)} - P_{PTO(i)})$$

με

- MCR<sub>ME(i)</sub> να είναι η μέγιστη συνεχής ισχύς της μηχανής
- P<sub>PTO(i)</sub> να είναι το 75% της εγκατεστημένης ισχύος της κάθε γεννήτριας άξονα διαιρεμένο με το βαθμό απόδοσης της εκάστοτε γεννήτριας

#### P<sub>AE</sub> (ισχύς των βοηθητικών μηχανών)

$P_{AE}$ : είναι η απαιτούμενη ισχύς των βοηθητικών μηχανημάτων συμπεριλαμβανομένης της απαραίτητης ισχύος για τα μηχανολογικά συστήματα πρόωσης και για την ενδίαιτηση στην κατάσταση φόρτωσης σχεδιασμού σε ταχύτητα  $V_{ref}$ . Η ισχύς που δεν είναι για την πρόωση, αποκλείεται. 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 του  $P_{AE}$ , ο IMO προτείνει δυο 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 :

- $0.025 \cdot MCR + 250$  , όταν το MCR είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 10000kW
- $0.05 \cdot MCR$  , όταν το MCR είναι μικρότερο από 10000kW

#### $P_{PTI(i)}$ (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. Η τιμή του  $P_{PTI(i)}$  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<sub>2</sub>)

$C_F$ : είναι ο συντελεστής μετατροπής μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και εκπεμπόμενων CO<sub>2</sub> 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. & A.E. αναφέρονται στις κύριες και βοηθητικές μηχανές αντίστοιχα. Εκφράζουν δηλαδή την ισοδύναμη εκπομπή του CO<sub>2</sub> από την καύση μιας δεδομένης μάζας των καυσίμων. Για τα βασικά καύσιμα της Ναυτιλίας οι τιμές φαίνονται στον πίνακα 1.3:

Καύσιμο	Προδιαγραφή καυσίμου	Περιεχόμενο σε C	$C_F$ (τόνοι CO <sub>2</sub> /τόνοι καυσίμου)
Diesel/ Gas oil	ISO 8217 Grades DMX-DMC	0.875	3.206
Light Fuel oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA-RMD	0.860	3.151
Heavy Fuel oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME-RMK	0.850	3.114
Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG)	Προπάνιο/Βουτάνιο	0.819/0.817	3.000/3.030
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)	-	0.75	2.750

Πίνακας 1.3: Συντελεστής εκπομπής CO<sub>2</sub> για κάθε τύπο καυσίμου

Πηγή: Rules for Classification and Construction VI, GL

### SFC (ειδική κατανάλωση καυσίμου)

SFC: είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα, μετρημένη σε gr/kWh (ονομάζεται και SFOC). 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 θα πρέπει να είναι η τιμή που καταγράφεται στο πιστοποιητικό EIAPP (Engine International Air Pollution Prevention) στο 75% του MCR αναλόγως της εκάστοτε πιστοποίησης. Για τις 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 θερμότητα δύναμη του υδροποιημένου φυσικού αερίου (48000KJ/kg)

### Capacity: Χωρητικότητα-Μεταφορική ικανότητα

Η μεταφορική ικανότητα ορίζεται ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Για πλοία επιβατηγά και Ro-Ro/επιβατηγά, η ολική χωρητικότητα (GRT) θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως μεταφορική ικανότητα.

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

Για όλα τα υπόλοιπα πλοία, ως χωρητικότητα ορίζεται το νεκρό φορτίο (t)

### V<sub>ref</sub> (ταχύτητα αναφοράς)

V<sub>ref</sub> : είναι η ταχύτητα του πλοίου μετρημένη σε ναυτικά μίλια ανά ώρα (κόμβοι) στο μέγιστο φορτίο σχεδιασμού σε βαθιά νερά και αν υποθεθεί 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<sub>j</sub>: αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης για λογαριασμό πλοίου ειδικού σχεδιασμού.
  - Για πλοία κλάσης πάγου θα πρέπει να λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη τιμή μεταξύ των f<sub>j0</sub> και f<sub>j,min</sub>, αλλά όχι μεγαλύτερος από 1. Οι τιμές φαίνονται στον πίνακα 1.4.

Ship type	f <sub>j0</sub>	f <sub>j,min</sub>			
		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	$(0.0227 * L_{PP}^{2.483}) / (\sum_i P_{ME(i)})$	$0.31 * L_{PP}^{0.16}$	$0.43 * L_{PP}^{0.12}$	$0.56 * L_{PP}^{0.09}$	$0.67 * L_{PP}^{0.07}$

Πίνακας 1.4: Συντελεστές f<sub>j0</sub> και f<sub>j,min</sub> για πλοία ειδικού σχεδιασμού

Πηγή: Rules for Classification and Construction VI, GL

- Ο παράγοντας f<sub>j</sub> για δεξαμενόπλοια μεταφοράς (shuttle tankers) περίσσειας ισχύος μεταξύ 80000 και 160000 τόνων DWT λαμβάνεται ίσος με 0.77. Τέτοιου είδους δεξαμενόπλοια χρησιμοποιούνται για τη φόρτωση του αργού



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

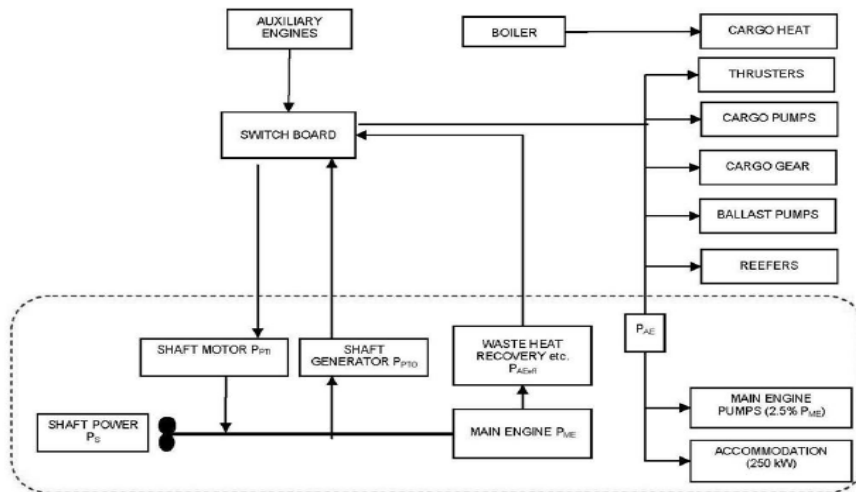
πετρελαίου από υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Είναι εξοπλισμένα με διπλό κινητήρα και δύο έλικες έτσι ώστε να υπάρχει η απαραίτητη εφεδρεία ισχύος

- Για τα υπόλοιπα είδη πλοίων το  $f_i$  λαμβάνεται ίσο με τη μονάδα.
- $f_w$ : αδιάστατος συντελεστής που δείχνει τη μείωση της ταχύτητας σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες ύψους κύματος, συχνότητας, κυμάτων και ανέμου.
- $f_{eff(i)}$ : συντελεστής διαθεσιμότητας της κάθε καινοτόμου τεχνολογίας ενεργειακής αποδοτικότητας
- $f_i$ : αδιάστατος συντελεστής χωρητικότητας (capacity) που αφορά οποιοδήποτε τεχνικό/ρυθμιστικό περιορισμό στη χωρητικότητα και πρέπει να λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα όταν η αναγκαιότητα του παράγοντα δεν είναι δεδομένη.
  - 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 πίνακα 1.5, αλλά όχι μικρότερος από το  $f_{i,min}=1$

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	$(0.1033 * L_{PP}^{2.328})$ /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	$(0.0474 * L_{PP}^{2.390})$ /Capacity	1.25	$2.10 * L_{PP}^{-0.12}$	$1.60 * L_{PP}^{-0.08}$	$1.25 * L_{PP}^{-0.04}$

**Πίνακας 1.5:** Συντελεστές  $f_{i0}$  και  $f_{i,min}$  για πλοία ειδικού σχεδιασμού  
Πηγή: Rules for Classification and Construction VI, GL

Στο σχήμα 1.12 που ακολουθεί παρουσιάζονται σχηματικά τα στοιχεία της μηχανολογικής εγκατάστασης που λαμβάνονται υπόψιν στον υπολογισμό του δείκτη EEDI.



**Σχήμα 1.12:** 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

### 1.5.2 Προσαρμογή EEDI για πλοία με ηλεκτροπρόωση

Στο σημείο αυτό γίνεται λόγος για τον υπολογισμό του EEDI όσον αφορά τα πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένο φυσικό αέριο. Αρχικά πρέπει να τονιστεί ότι η γραμμή αναφοράς έχει δημιουργηθεί λαμβάνοντας υπ' όψιν, κατά κύριο λόγο πλοία με συμβατική πρόωση. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μη ασφαλή αποτελέσματα και συγκεκριμένα σε περιορισμένη αποτύπωση του περιβαλλοντικού ίχνους των LNG carriers που κινούνται με ηλεκτροπρόωση. Οι συζητήσεις βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο. Παρ' όλα αυτά υπάρχει μία μεθοδολογία η οποία αποδίδει την ενδεικτική τιμή EEDI (Estimated Index Value). Συγκεκριμένα:

- Ο συντελεστής  $C_F$  που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.5.1 είναι σταθερός για όλες τις μηχανές, συμπεριλαμβανομένου και των ηλεκτρογεννητριών.  
 $C_{F,ME} = C_{F,AE} = C_F = 3.1144 \text{ gCO}_2 / \text{g H.F.O.}$   
 $C_{F,ME} = C_{F,AE} = C_F = 2.75 \text{ gCO}_2 / \text{g L.N.G}$
- Η ισχύς των κύριων μηχανών  $P_{ME(i)}$  αντιστοιχεί στο 75% της εγκατεστημένης ισχύος. Για πλοία με ηλεκτροπρόωση:  $P_{ME(i)}=0$
- Οι καινοτόμες τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας όπως και οι γεννήτριες που κινούνται με τη βοήθεια του ελικοφόρου άξονα εξαιρούνται από τον υπολογισμό του δείκτη.
- Ο υπολογισμός της ισχύος των βοηθητικών μηχανημάτων  $P_{AE}$ , υπολογίζεται όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 1.5.1. Ο βαθμός απόδοσης των γεννητριών μπορεί να θεωρηθεί 0.95 αν δεν υπάρχουν άλλα δεδομένα
- Η ισχύς του άξονα  $P_{PT(i)}$  αντιστοιχεί στο 75% της ονομαστικής ισχύος των κινητήρων διαιρεμένη με τον βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να ληφθεί και εδώ ίσος με 0.95. Επιπλέον θα πρέπει να διαιρεθεί και με τον βαθμό απόδοσης του αξονικού συστήματος πρόωσης. Η τιμή 0.92 λαμβάνεται σε αυτήν την περίπτωση.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα παραπάνω υπολογίζεται ο δείκτης EEDI για πλοία που δεν διαθέτουν συμβατική πρόωση:

$$Estimated\ Index\ Value = \frac{(C_{F,ME} \cdot SFC_{ME} \cdot \sum_{i=1}^n P_{ME(i)} + C_{F,AE} \cdot SFC_{AE} \cdot (P_{AE} + \sum_{i=1}^n P_{PTI(i)}))}{Capacity \cdot V_{ref}}$$

## 1.6 Ενεργειακός δείκτης EEOI

Όπως προαναφέρθηκε η δημιουργία του δείκτη EEDI είχε ως στόχο τη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ο δείκτης όμως αυτός αφορά το στάδιο της σχεδίασης του πλοίου με αποτέλεσμα να μην αντιπροσωπεύει πλήρως τους πραγματικούς ρύπους του πλοίου. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή ενός άλλου δείκτη που θα αφορά το στάδιο λειτουργίας του πλοίου. Οι οδηγίες (MEPC. 1-Circulatoe 684) παρουσιάζουν το περιεχόμενο του δείκτη **EEOI**.

### 1.6.1 Ορισμός EEOI

Ο πιο απλός τύπος του δείκτη EEOI ( Energy Efficiency Operational Indicator) ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας των εκπεμπόμενων ρύπων CO<sub>2</sub> ανά μονάδα μεταφερόμενου έργου. Οι μονάδες μέτρησης του εξαρτάται από τις μονάδες των όρων του πηλίκου.

Οι προτεινόμενοι τύποι είναι :

$$EEOI = \frac{M_{CO_2}}{Transport\ work}, EEOI = \frac{\sum_j (FC_j \cdot C_{Fj})}{m_{cargo} \cdot D}, EEOI_{Average} = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \cdot C_{Fj})}{\sum_i (m_{CARGO} \cdot D)}$$

Οι μονάδες μέτρησης του εξαρτάται από τις μονάδες των όρων του πηλίκου. Μπορεί να είναι δηλαδή :

- t<sub>CO2</sub>/(t x nm)
- t<sub>CO2</sub>/(TEU x nm)
- t<sub>CO2</sub>/(person x nm)

#### **FC:** Κατανάλωση καυσίμου

Η κατανάλωση καυσίμου ορίζεται ως η ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται σε ένα ταξίδι στην θάλασσα ή στο λιμάνι ή σε μία χρονική περίοδο, από τις κύριες και τις βοηθητικές μηχανές.

#### **D:** Διαδρομή ταξιδιού

Η διαδρομή του ταξιδιού αναφέρεται σε ναυτικά μίλια και αντιστοιχεί στο χρόνο που υπολογίζεται η κατανάλωση του καυσίμου

#### **Πλοία και είδος φορτίου**

Οι οδηγίες για τον υπολογισμό του δείκτη EEOI αναφέρονται σε όλα τα πλοία που επιτελούν μεταφορικό έργο:

- Τύποι πλοίων
  - Πλοία ξηρού φορτίου

- Tankers
  - Gas Tankers
  - Containerships
  - Πλοία Ro- Ro
  - Πλοία γενικού φορτίου
  - Επιβατηγά πλοία και πλοία επιβατηγά Ro-Ro
- Τύποι φορτίου  
Ο όρος φορτίου περιλαμβάνει : όλα τα φορτία τύπου αερίου, υγρού και φορτίο χύδην, γενικού φορτίου, containers (συμπεριλαμβανομένων και άδειων containers), κατεψυγμένο φορτίο, ξυλεία, οχήματα και επιβάτες.

#### **Transport work or m<sub>CARGO</sub>**

Γενικά το μεταφορικό έργο υπολογίζεται ως :

- Για πλοία ξυρού φορτίου, tankers, gas carriers, πλοία Ro-Ro, γενικού φορτίου πλοία το μεταφορικό έργο σε τόνους (t) είναι το φορτίο που μεταφέρουν.
- Για τα containerships τα οποία φέρουν μόνο containers το μεταφορικό έργο είναι ο αριθμός των container (TEU) ή η συνολική μάζα του φορτίου που μεταφέρουν σε τόνους (t)
- Για τα containerships που μεταφέρουν containers και άλλα φορτία, μια μάζα 10t πρέπει να προστεθεί για κάθε TEU και μία μάζα 2t αντίστοιχα για κάθε άδειο TEU
- Για επιβατηγά πλοία, συμπεριλαμβανομένων των Ro-Ro, το μεταφορικό έργο είναι ο αριθμός των επιβατών ή η χωρητικότητα του πλοίου μετρημένη σε (GT)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ**

### **2.1 Ορισμός**

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απευθείας ή μέσω μειωτήρων από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες diesel, οι ατμοστρόβιλοι και οι αεριοστρόβιλοι 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

### **2.2 Ιστορική αναδρομή**

Η πρόωση των πλοίων και των υποβρυχίων με ηλεκτρικούς κινητήρες δεν αποτελεί μια σύγχρονη εφαρμογή. Μετά τις μάλλον πειραματικές εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης με μπαταρία στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα που έγιναν στη Ρωσία και την Γερμανία, η ηλεκτροπρόωση πρώτης γενιάς ήρθε στο προσκήνιο την δεκαετία του 1920 ως αποτέλεσμα του έντονου ανταγωνισμού για την αύξηση της ταχύτητας των υπερωκεάνιων επιβατηγών πλοίων. Εκείνη την εποχή, υψηλή ισχύς πρόωσης μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με ηλεκτρικές μηχανές. Το 'S/S Normandie' ήταν ένα από τα πιο φημισμένα ηλεκτρικά πλοία. (σχήμα 2.1)



Σχήμα 2.1: S/S Normandie

Γεννήτριες κινούμενες από ατμοστρόβιλο παρείχαν ηλεκτρική ισχύ στους σύγχρονους κινητήρες 29MW σε καθέναν από τους 4 ελικοφόρους άξονες. Η ταχύτητα περιστροφής οριζόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Οι γεννήτριες συνήθως τροφοδοτούν έναν κινητήρα η καθεμία, αλλά υπήρχε επίσης η δυνατότητα να τροφοδοτούνται δύο κινητήρες από μία γεννήτρια στις χαμηλότερες ταχύτητες ταξιδιού.

Με την εισαγωγή των οικονομικών και αποδοτικών μηχανών diesel στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η τεχνολογία του ατμοστροβίλου και της ηλεκτροπρόωσης εξαφανίστηκε από τα εμπορικά σκάφη μέχρι τη δεκαετία του 1980.

Η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας, πρώτα με τον ανορθωτή AC/DC τη δεκαετία του 1970 και μετά με τους μετατροπείς AC/AC στις αρχές της δεκαετίας του 1980 έκανε δυνατή την παραγωγή συστημάτων ηλεκτροπρόωσης δεύτερης γενιάς. Ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σταθερής τάσης και συχνότητας αποτελούμενος από μια σειρά γεννητριών που τροφοδοτούσαν το ίδιο δίκτυο παρείχε την πρόωση όπως επίσης και την ηλεκτρική ενέργεια για όλα τα φορτία του πλοίου. Ο έλεγχος της πρόωσης γινόταν ελέγχοντας την ταχύτητα της προπέλας σταθερού βήματος. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε ειδικά σκάφη όπως ερευνητικά πλοία και παγοθραυστικά, αλλά και κρουαζιερόπλοια. Το 'S/S Queen Elizabeth II' δέχθηκε μετατροπή με σύστημα ηλεκτροπρόωσης στα μέσα της δεκαετίας του 1980, και ακολουθήθηκε από διάφορα άλλα κρουαζιερόπλοια και τάνκερ.

Το 1990 έκανε την εμφάνιση του το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (podded propulsion). Σε αυτό ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται μέσα σε μια λοβοειδή κατασκευή που τοποθετείται στη θάλασσα. Η έλικα, που είναι απευθείας συνδεδεμένη με τον κινητήρα έχει τη δυνατότητα περιστροφής κατά 360° προσφέροντας στο πλοίο ευκινησία σε καταστάσεις ελιγμών. Σημειώνεται ότι η διάταξη αυτή αρχικά αναπτύχθηκε για να βελτιώσει την επίδοση των παγοθραυστικών, αλλά αποδείχτηκε ότι έχει πλεονεκτήματα στην υδροδυναμική απόδοση και ευελιξία του σκάφους. Μετά την πρώτη εφαρμογή στο κρουαζιερόπλοιο 'M/S Elation', τα πλεονεκτήματα ήταν τόσο πειστικά που η αζιμουθιακή πρόωση έγινε δεδομένη για τα νέα κρουαζιερόπλοια σχεδόν άμεσα.

### 2.3 Εφαρμογές-Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα για να χρησιμοποιηθεί η ηλεκτροπρόωση στα πλοία. Τα πλεονεκτήματα επικεντρώνονται στις ακόλουθες περιοχές: σχεδίασης-λειτουργίας-οικονομικών. Τα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Μειωμένο κόστος στο σύνολο ζωής λόγω μικρότερης κατανάλωσης καυσίμου, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που δεν υπάρχει σταθερό φορτίο
- Μικρότερα έξοδα συντήρησης
- Χρήση ελαφρότερων και λιγότερο ρυπογόνων καυσίμων
- Απαιτήσεις για μικρότερο χώρο για την εγκατάσταση του μηχανολογικού εξοπλισμού με αποτέλεσμα την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου του πλοίου
- Λόγω της τροφοδότησης των κινητήρων με ηλεκτρική ισχύ μέσω καλωδίων υπάρχει ευελιξία στην εγκατάστασή τους και δεν είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν σε κοντινή απόσταση από τη γεννήτρια.
- Λιγότερος θόρυβος και δονήσεις, αφού η γεννήτρια δουλεύει σε σταθερές στροφές.
- Βελτιωμένη ευκολία χειρισμού.

Αυτά τα πλεονεκτήματα θα πρέπει να συγκριθούν με τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος επένδυσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μειονέκτημα αυτό θα περιοριστεί στο μέλλον σε περίπτωση μαζικότερης παραγωγής.

- Απώλειες μετάδοσης . Η μεσολάβηση περισσότερων μηχανημάτων από τις ηλεκτρογεννήτριες μέχρι τους κινητήρες αυξάνει τις απώλειες ενέργειας.
- Έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού. Η συμβατική πρόωση έχει κυριαρχήσει με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κατηρτισμένο και εξοικειωμένο πλήρωμα για ηλεκτροπρόωση.

Οι εφαρμογές οι οποίες χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο ηλεκτροκινητήρες για την πρόωσή τους ή για τις υπόλοιπες λειτουργικές τους ανάγκες φαίνονται στην συνέχεια.

### **Επιβατηγά σκάφη- Σκάφη αναψυχής.**

Τα επιβατηγά σκάφη έχουν απαιτήσεις για άνεση σχετικές με τον θόρυβο και τις δονήσεις. Επίσης η αξιοπιστία είναι πολύ σημαντική για την ασφάλεια των επιβατών και του σκάφους. Ως αποτέλεσμα, τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης εκτιμήθηκαν από νωρίς. Η λίστα των κρουαζιερόπλοιων με ηλεκτροπρόωση μεγαλώνει συνεχώς. Ένα μεγάλο ποσοστό των καινούριων πλοίων εξοπλίζονται με συστήματα ηλεκτροπρόωσης λόγω της καλύτερης ευελιξίας και εξοικονόμησης καυσίμων μέσω της αύξησης της απόδοσης της πρόωσης μέχρι και 10%. Η ισχύς πρόωσης μεταβάλλεται με το μέγεθος του σκάφους, από λίγα MW για μικρά σκάφη μέχρι 30-40 MW για μεγάλα κρουαζιερόπλοια. Το ηλεκτρικό φορτίο εκτός των κινητήρων (π.χ. φωτισμός) μπορεί να είναι σημαντικό μέρος της εγκατεστημένης ισχύος, και για ένα μεγάλο κρουαζιερόπλοιο της τάξης 10-15MW.

### **Εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου: Μονάδες γεώτρησης**

Τα σκάφη αυτού του τύπου έχουν μεγάλη ισχύ πρόωσης, τυπικά 20-50 MW. Μαζί με τον εξοπλισμό γεώτρησης και τα λοιπά φορτία η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 25-55 MW. Η εγκατάσταση έχει έναν κοινό σταθμό παραγωγής για όλα τα φορτία, που επιτρέπει ευελιξία στην λειτουργία, υψηλή αποδοτικότητα και υψηλή διαθεσιμότητα ισχύος.

### **Πολεμικά πλοία**

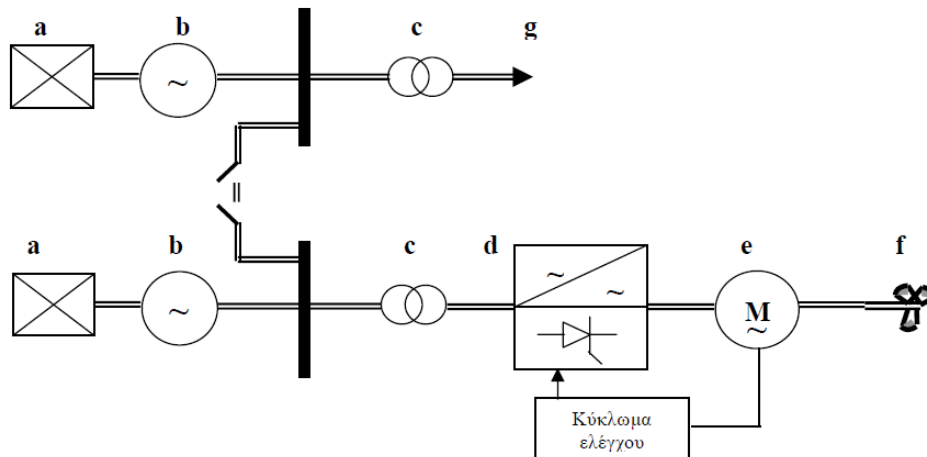
Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης σε πολεμικά πλοία, και έχουν κατασκευαστεί ήδη αρκετά ηλεκτρικά πολεμικά πλοία. Για τα υποβρύχια, εφαρμόζεται ηλεκτροπρόωση με πυρηνική ενέργεια, κυψέλες καυσίμου ή με ντιζελογεννήτρια και αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες. Η ηλεκτρική πρόωση για πολεμικά πλοία δεν διαφέρει ως σύνολο από αυτή των εμπορικών πλοίων, αλλά οι λύσεις που εφαρμόζονται μπορεί να διαφέρουν αφού οι απαιτήσεις για διαθεσιμότητα ισχύος είναι συνήθως αυστηρότερες. Επίσης, η δυνατότητα αντοχής κραδασμών και ο χαμηλός παραγόμενος θόρυβος είναι προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης σε ένα πολεμικό πλοίο.

### **Ερευνητικά πλοία**

Γεωτεχνικά ερευνητικά πλοία, ωκεανογραφικά και σκάφη αλιευτικής έρευνας έχουν πολύ αυστηρές απαιτήσεις για χαμηλό υποβρύχιο θόρυβο, τυπικά αρκετές δεκάδες dB κάτω από τα επίπεδα άλλων εφαρμογών. Αυτό παραδοσιακά επιτυγχάνονταν με την χρήση άμεσης πρόωσης με κινητήρες ΣΡ, με ειδικές προβλέψεις για φιλτράρισμα και μείωση των δονήσεων και των μεταβολών της ροπής. Με την χρήση μοντέρνων μετατροπέων συχνότητας και τεχνικών φιλτραρίσματος, οι κινητήρες ΕΡ έγιναν επίσης κατάλληλοι για τέτοιες απαιτητικές εφαρμογές, και έχουν ενταχθεί στην σχεδίαση νέων πλοίων.

## 2.4 Διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τρόπων για το σχεδιασμό ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης, αλλά τα κύρια στοιχεία που διέπουν την λειτουργία του παραμένουν αναλλοίωτα. Οι κινητήρες των ηλεκτρογεννητριών, οι ηλεκτρογεννήτριες και οι προωστήριοι κινητήρες αποτελούν την καρδιά του συστήματος. Στο σχήμα 2.2 παριστάνεται μια τυπική διάταξη ενώ στην συνέχεια θα αναλυθούν τα κυριότερα στοιχεία.



**Σχήμα 2.2:** Γενικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου ενέργειας πλοίου (a= κινητήρια μηχανή, b=σύγχρονη γεννήτρια, c=μετασχηματισμός ισχύος, d=μετατροπέας συχνότητας, e=προωστήριος κινητήρας, f=έλικα, g=λοιπά φορτία.

Πηγή :Ηλεκτρονικά μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα- Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιαν. , 2006

### 1. Κινητήριες Μηχανές

Το πρώτο στοιχείο ζωτικής σημασίας για την ηλεκτροπρόωση αποτελούν οι κινητήριες μηχανές. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες που συναντώνται στην εμπορική ναυτιλία αλλά και σε στρατιωτικές εφαρμογές : Αεριοστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι με πυρηνική ενέργεια και συμβατικοί κινητήρες diesel. Οι ατμοστρόβιλοι χρησιμοποιούν τον ατμό, ο οποίος παράγεται κατά την καύση σε λέβητες. Ανάμεσα στον στρόβιλο και την ηλεκτρογεννήτρια παρεμβάλλεται μειωτήρας αφού η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του στροβίλου αντιστοιχεί σε ορισμένες χιλιάδες στροφών. Η αντιστροφή της κίνησης πραγματοποιείται από έναν ξεχωριστό στρόβιλο ο οποίος στρέφει τον άξονα κατά την αντίστροφη φορά. Ο άξονας κατά κύριο λόγο φέρει προπέλα σταθερού βήματος. Αυτοί οι τύποι κινητήριων μηχανών συναντώνται σε υβριδικά σκάφη. Οι συμβατικοί κινητήρες diesel αντιστοιχούν σε μεσόστροφους κινητήρες. Όπως και προηγουμένως υπάρχει ένας μειωτήρας αλλά η αντιστροφή της κίνησης επιτυγχάνεται με την χρήση ενός πινιόν εντός του μειωτήρα ή με τη χρήση προπέλας μεταβλητού βήματος. Τέλος, με την πραγματοποίηση πυρηνικής αντίδρασης παράγεται ατμός για την κίνηση του άξονα της γεννήτριας ενώ σε όλα τα υπόλοιπα η λειτουργία του είναι όμοια με του συμβατικού στροβίλου. Τέτοιου είδους στροβίλους συναντώνται σε υποβρύχια σκάφη.

### 2. Σύγχρονες Γεννήτριες

Η σύγχρονη γεννήτρια (synchronous generator), ή αλλιώς εναλλακτήρας, είναι σύγχρονη μηχανή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη



ηλεκτρική ενέργεια. Ονομάζεται σύγχρονη επειδή οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει μια σύγχρονη γεννήτρια είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα της με συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και, καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Τελικά το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την εξίσωση :

$$f_c = \frac{n_m \cdot P}{120}$$

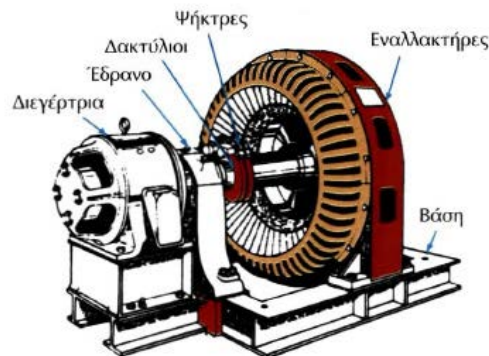
όπου:

**f<sub>c</sub>**: η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

**n<sub>m</sub>**: η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε r/min, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις σύγχρονες μηχανές

**P**: ο αριθμός των πόλων

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.3) παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται μια σύγχρονη γεννήτρια



Σχήμα 2.3: Σύγχρονη ηλεκτρογεννήτρια

### 3. Μετατροπείς Συχνότητας

Στις εγκαταστάσεις Ε.Ρ., στις οποίες η συχνότητα του παραγομένου ρεύματος είναι σταθερή, η συνεχής ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα πρόωσης (και επομένως της έλικας) είναι δυνατή εάν αυτός τροφοδοτηθεί όχι απ' ευθείας από το δίκτυο αλλά από διάταξη μετατροπής της συχνότητας. Η διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης κατά τα τελευταία έτη ίσως δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τους μετατροπείς αυτούς. Η θεμελιώδης διάταξη μετατροπής είναι η γέφυρα 6-παλμών (ανορθωτής αλλά και κυρίως αντιστροφέας). Ωστόσο για μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων κατασκευάζονται πιο σύνθετες διατάξεις. Έτσι ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από δύο αντιστροφείς 6 παλμών, των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30ο. Σε σύγχρονες ναυπηγήσεις αξιοποιούνται προς το παρόν έως και γέφυρες 24 παλμών. Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σήμερα είναι:

### **Ζεύγη ανορθωτών-αντιστροφών SPWM**

Στις διατάξεις αυτές, αρχικά γίνεται ανόρθωση από ΕΡ σε ΣΡ και στη συνέχεια αντιστροφή από ΣΡ σε ΕΡ. Στον σύνδεσμο ΣΡ (DC-link) μεταξύ των δύο μετατροπέων παρεμβάλλεται κάποιο στοιχείο που διατηρεί σταθερή την τάση ή το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας.

α) πηγές ρεύματος (CSI Current Source Inverters) με SPWM: στο σύνδεσμο συνεχούς ρεύματος παρεμβάλλεται πηνίο που διατηρεί το ρεύμα τροφοδοσίας σταθερό με αποτέλεσμα ο μετατροπέας εμφανίζεται να λειτουργεί ως πηγή (σταθερού) ρεύματος.

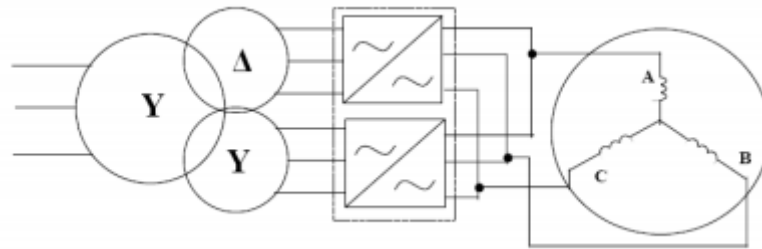
β) πηγές τάσεως (VSI Voltage Source Inverters) με SPWM: στο σύνδεσμο ΣΡ παρεμβάλλεται πυκνωτής που διατηρεί την τάση τροφοδοσίας σταθερή με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να εμφανίζεται ότι λειτουργεί ως πηγή (σταθερής) τάσεως.

γ) συγχρομετατροπείς (synchro-converters) ή LCI (Load Commutated Inverters, LCI): πρόκειται για ειδική περίπτωση μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI) στην οποία όμως οι διακόπτες ισχύος σβήνουν μόνον με τη βοήθεια του φορτίου τους. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημά τους καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα σβέσεως. Βρίσκουν εφαρμογή σε προωστήρια συστήματα με σύγχρονους κινητήρες μεγάλης ισχύος.

### **Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)**

Με τις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή από μία μορφή ΕΡ συγκριμένου πλάτους και συχνότητας σε άλλη μορφή ΕΡ διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Στην περίπτωση των προωστήριων συστημάτων πλοίων, λαμβάνει χώρα υποβιβασμός συχνότητας (από 50/60 Hz σε 2-3 Hz). Η απλή περίπτωση ενός τριφασικού κυκλομετατροπέα 6 παλμών (6-παλμικός) αποτελείται από 36 ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος, 12 για κάθε φάση. Σε κάθε φάση αντιστοιχούν δύο γέφυρες διακοπών με 6 διακόπτες η κάθε μία. Η μία γέφυρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κυματομορφής κατά τη θετική ημιπερίοδο και η άλλη κατά την αρνητική. Στις γέφυρες εισέρχονται όλες οι φάσεις εισόδου.

Ένας κυκλομετατροπέας 12 παλμών αποτελείται από δύο κυκλομετατροπείς 6 παλμών των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά  $30^\circ$ . Η διαφορά αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μετασχηματιστή με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα από τα οποία το ένα είναι σε συνδεσμολογία κατά Υ ενώ το άλλο κατά Δ. Οι έξοδοι του κυκλομετατροπέα 12 παλμών μπορεί να τροφοδοτούν είτε ένα απλό τριφασικό τύλιγμα κινητήρα, (Σχήμα 2.4), είτε το διπλό τριφασικό τύλιγμα ενός ειδικού τύπου κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 2.4: Κυκλομετατροπέας 12 παλμών που τροφοδοτεί τριφασικό κινητήρα

#### 4. Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης

Η πλειονότητα των κινητήρων είναι σύγχρονοι, οι οποίοι έχουν βαθμό απόδοσης 96 - 98%, υψηλότερο κατά 3 - 4% από τον βαθμό απόδοσης κινητήρων επαγωγής. Η ονομαστική τάση λειτουργίας στις εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος είναι 3.3 – 6.6 kV. Στους σύγχρονους κινητήρες έρχεται να προστεθεί μία νέα κατηγορία αυτή των σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες των οποίων η απόδοση σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους υπερβαίνει το 98%. Σε αυτές τις σύγχρονες μηχανές, το τυλίγμα διεγέρσεως του δρομέα (που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα) έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο καθώς και στις δύο περιπτώσεις παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα. Το προφανές πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν έχουν ανάγκη παροχής σε ΣΡ, ενώ με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και η συνολική απόδοση καθώς μεταξύ των άλλων μειώνονται και οι συνολικές απώλειες Joule στα τυλίγματα. Η ιδέα της χρήσης μόνιμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων “μόνιμων μαγνητών” (κράματα σαμαρίου-κοβαλτίου, Sm-Co και νεοβιδίου-σιδήρου-βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες.

Οι κινητήρες αυτοί με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συναγωνίζοντας έτσι μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations). Τα τελευταία χρόνια ερευνάται η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες. Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος. Η εταιρεία American Superconductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25MW.

## 2.5 Λόγοι χρήσης ηλεκτροπρόωσης σε πλοία μεταφοράς LNG

### 1. Δυνατότητα χρησιμοποίησης φυσικού αερίου ως καύσιμο

Η εξέλιξη της τεχνολογίας δεν έχει φτάσει σε σημείο ώστε να υπάρχουν αυτή τη στιγμή διαθέσιμες συμβατικές δίχρονης μηχανές που να καταναλώνουν φυσικό αέριο. Αν και γίνονται μελέτες προς αυτή την κατεύθυνση με τις εταιρίες MAN B&W και Wartsila να πρωταγωνιστούν, δεν υπάρχουν αξιόπιστοι κινητήρες σήμερα. Από την άλλη πλευρά, οι σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες μπορούν να καταναλώσουν συμβατικό πετρέλαιο diesel αλλά και φυσικό αέριο έχουν τεθεί ήδη σε κυκλοφορία και έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη

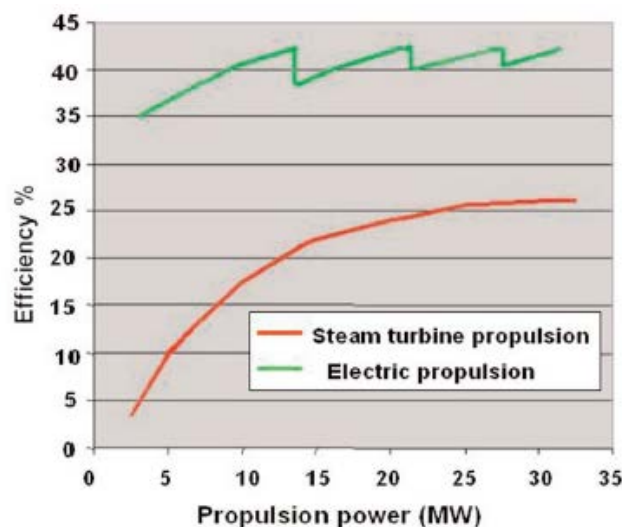
επιτυχία. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η μηχανή Wartsila L50DF η οποία διατίθεται από 5.7-17.1 MW στις 500 στροφές ανά λεπτό. (σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.5: Wartsila 6L50DF. Αποδίδει 5700kW στις 500rpm

### 2. Υψηλότερος βαθμός απόδοσης κατά την πρόωση

Σε ονομαστικό φορτίο λειτουργίας, ο βαθμός απόδοσης μια ηλεκτρομηχανής διπλού καυσίμου είναι περίπου 47%. Θεωρώντας απώλειες της τάξης του 8-10% λόγω μετάδοσης από την ηλεκτρογεννήτρια στους κινητήρες πρόωσης λόγω παρεμβολής μετασχηματιστών, πίνακα διακοπής ισχύος, ρυθμιστών συχνότητας ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Παρόλα αυτά παραμένει μεγαλύτερος σε σχέση με το 30% που αντιστοιχεί στον β.α. συστήματος πρόωσης με ατμό. Η διαφορά αυτή μεγαλώνει ακόμα περισσότερο σε καταστάσεις ελιγμών. 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 πληρούται η απαίτηση ισχύος από το πλοίο. Ο βαθμός απόδοσης παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 2.6



Σχήμα 2.6: Βαθμός απόδοσης από την παροχή καυσίμου έως τον άξονα της προπέλας ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης διπλού καυσίμου σε σύγκριση με ένα σύστημα πρόωσης ατμού.

Πηγή: Διπλωματική εργασία Θεόδωρος Κουτσούρης

### 3. Χαμηλότερη εγκατεστημένη ισχύς

Στα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια είναι αρκετά υψηλή. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι σε πλοίο χωρητικότητας 126,000t οι ανάγκες για την διαχείριση του φορτίου σε κατάσταση εκφόρτωσης ανέρχονται στα 6400kW περίπου. Η απαίτηση αυτή σε ισχύ παρουσιάζεται μόνο σε καταστάσεις επεξεργασίας του φορτίου ενώ κατά τη διάρκεια της πορείας εν πλώ, οι απαιτήσεις αυτές μειώνονται αισθητά της τάξης του 60-70%. Σε πλοία με συμβατική πρόωση όπου η ηλεκτρική ισχύς διαχωρίζεται από την ισχύ για πρόωση παρατηρείται υπερδιαστασιολόγηση των γεννητριών, ενώ συχνά λειτουργούν σε χαμηλά φορτία κατά την εν πλώ λειτουργία τους. Αντίθετα, στα πλοία με ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιείται μία κοινή μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύς για τις καταστάσεις πρόωσης και εκφόρτωσης του φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να μειωθεί αφού η πρόωση και η επεξεργασία του φορτίου αφορούν δύο ανεξάρτητα χρονικά διαστήματα.

### 4. Ηλεκτρική μετάδοση μεταβλητής ταχύτητας

Ο συνδυασμός ηλεκτρικού κινητήρα και μετατροπέα ισχύος συνεπάγεται τη δυνατότητα μέγιστης ροπής σε ένα πολύ μεγάλο εύρος στροφών (από τις ελάχιστες ως τις μεγαλύτερες). Ο μετατροπέας ισχύος υπάρχει για να προστατεύει τα μηχανικά μέρη ρυθμίζοντας ανάλογα με τις ανάγκες την ισχύ και τη ροπή. Αποτέλεσμα είναι η άμεση απόκριση και εναλλαγή της ταχύτητας του πλοίου σε καταστάσεις ελιγμών αφού η έλικα του πλοίου μπορεί να παρουσιάζει μέγιστη ροπή σε οποιαδήποτε επίπεδο στροφών.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : ΠΡΟΩΣΗ ΜΕ ΑΤΜΟ****3.1 Ιστορική αναδρομή**

Η πρώτη συσκευή η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι παρήγαγε μηχανικό έργο με τη βοήθεια του ατμού είναι η σφαίρα του Ήρωνος (Αλεξάνδρεια, 120 π.Χ.). Συγκεκριμένα, μία κοίλη σφαίρα ήταν τοποθετημένη πάνω από έναν κλειστό λέβητα με τον οποίο επικοινωνούσε μέσω στροφίγγων. Ατμός εισέρεε στην σφαίρα και έφευγε με ταχύτητα από δύο αντιδιαμετρικά στόμια. Με τον τρόπο αυτό η σφαίρα εκτελούσε περιστροφική κίνηση. Έπρεπε να περάσουν πάνω από 1500 χρόνια για να κατασκευαστεί η πρώτη ατμομηχανή (1543) από τον Blasco de Garay που κίνησε ένα πλοίο στο λιμάνι της Βαρκελώνης. Το 1630, ο ιταλός μηχανικός Branca κατασκεύασε την πρώτη συσκευή που μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ατμοστρόβιλος δράσης: ατμός που παράγεται σε λέβητα, περνά μέσα από στόμιο και κατευθύνεται στα πτερύγια τροχού, τον οποίο περιστρέφει. Στην ίδια κατεύθυνση κινήθηκε και ο ατμοστρόβιλος de Laval (εφευρέθηκε από τον Gustaf de Laval). Η ροή του ατμού επιταχύνόταν πριν αυτός εισαχθεί στην τουρμπίνα. Ο σύγχρονος ατμοστρόβιλος αντίδρασης ανακαλύφθηκε το 1884 από τον Άγγλο-Ιρλανδό Charlew Parsons και παρήγαγε ισχύ 2000HP. Εγκαταστάθηκε στο πλοίο Turbinia το 1894(σχήμα 3.1).



**Σχήμα 3.1:** Turbinia, το πρώτο ατμοστροβιλοκίνητο πλοίο

Η εφεύρεση του Parson αποδείχτηκε ότι δεχόταν αναβάθμιση. Σύντομα η εφεύρεση του υιοθετήθηκε από όλους τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας με την ισχύ των γεννητριών να έχει αυξηθεί σε 50.000kW.

Πλέον ένας από τους πρωταγωνιστές της σύγχρονης θεωρίας του ατμοστροβίλου είναι ο Σλοβάκος φυσικός, Aurel Stodola, μηχανικός και καθηγητής της Πολυτεχνικής σχολής της Ελβετίας στη Ζυρίχη. Το αυθεντικό του έργο με τίτλο ‘Die Dampfturbinen und ihre Aussichten als Wärmekraftmaschinen’(ο ατμοστρόβιλος και η προοπτική του ως μηχανή θερμικής ενέργειας) εκδόθηκε στο Βερολίνο το 1903 συνέβαλε καθοριστικά στην εξέλιξη της θεωρίας του ατμοστροβίλου.

### 3.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Αν και τα τελευταία χρόνια στην ναυτική βιομηχανία έχουν κυριαρχήσει οι δίχρονοι κινητήρες Diesel οι ατμοστρόβιλοι συνεχίζουν να καταλαμβάνουν ένα τμήμα (έστω και περιορισμένο) της αγοράς. Η επιβίωση τους οφείλεται στα ακόλουθα πλεονεκτήματά τους:

- Οι ατμοστρόβιλοι δεν περιορίζονται από θέμα ισχύος και μπορούν να κατασκευαστούν για την ικανοποίηση οποιαδήποτε ισχύος πρόωσης. Οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις αντιμετωπίζονται με ασφάλεια και περιορίζονται μόνο από τον εκάστοτε λέβητα.
- Η περιστροφική κίνηση είναι πιο απλή από την παλινδρομική και οι αζυγοστάθμητες δυνάμεις που υπάρχουν στις παλινδρομικές μηχανές ελαχιστοποιούνται.
- Μικρό κόστος συντήρησης.
- Μειωμένη κατανάλωση λυπαντικών.

Συγκεκριμένα η χρήση τους καθίσταται ιδιαίτερος σημαντική σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Τα LNG carriers διαθέτουν μονωμένες δεξαμενές για να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των χαμηλών θερμοκρασιών μεταφοράς φορτίου. Έτσι περιορίζεται η ποσότητα του φυσικού αερίου που μεταφέρεται, να φτάσει το σημείο βρασμού(boil off gas BOG) και να εξατμιστεί. Όμως κατά τη μεταφορά, για να διατηρηθεί η χαμηλή θερμοκρασία που απαιτείται, η εξατμική είναι αναπόφευκτη. Προκειμένου να ελεγχθεί η αύξηση της πίεσης των δεξαμενών, ένα μέρος των εξατμίσεων της ποσότητας του αερίου που φτάνει στο σημείο βρασμού επανυγροποιείται (BOG-reliquefaction plant) και ένα μέρος μένει ελεύθερο για οποιαδήποτε άλλη χρήση. Επομένως, η χρήση λεβήτων και ατμοστρόβιλου ως μέσου πρόωσης συνεπάγεται:

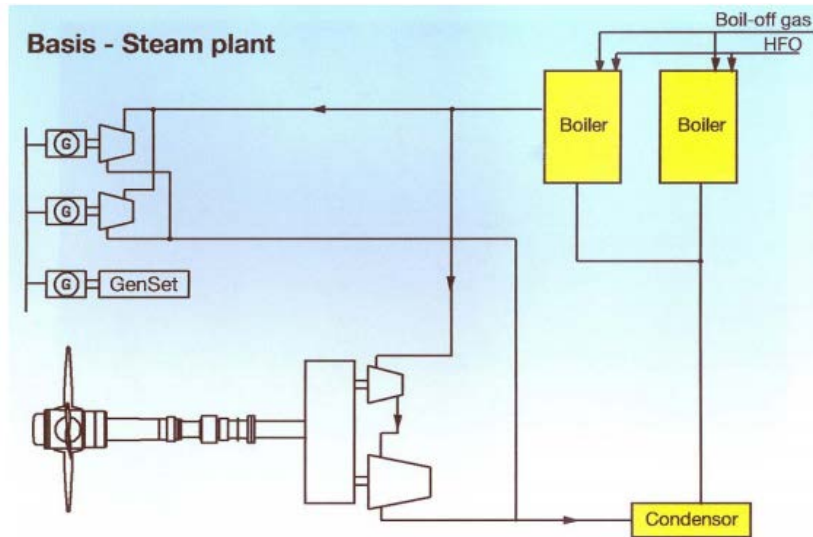
- Έναν εύκολο και αξιόπιστο τρόπο εκμετάλευσης του boil-off gas (BOG). Οι ενεργειακές ανάγκες για πρόωση υπερβαίνουν τη διαθέσιμη ποσότητα φυσικού καυσίμου που απελευθερώνεται, με αποτέλεσμα να υπάρχει πλήρης αξιοποίησή της.
- Οι λέβητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν με τον ίδιο τρόπο τόσο χαμηλής ποιότητας καύσιμο όσο και boil-off gas.

Από την άλλη πλευρά όμως, η χρήση ατμοστρόβιλων ως μηχανή πρόωσης επιφέρει σημαντικά μειονεκτήματα:

- Χαμηλή απόδοση της εγκατάστασης με συγχρόνως μεγάλη κατανάλωση καυσίμου.
- Μεγάλο βάρος εγκατάστασης. Αν και ο ατμοστρόβιλος είναι μία ελαφριά σχετικά μηχανή, ο λέβητας που χρειάζεται για την παραγωγή του ατμού αναιρεί το πλεονέκτημα αυτό.
- Η περιορισμένη χρήση στρόβιλων ατμού στην ναυτιλία έχει περιορίσει την παραγωγή τους. Παραγγελίες για νέες μηχανές και μειωτήρες συνεπάγονται μεγάλο χρόνο παράδοσης και υψηλό κόστος λόγω της μη μαζικής παραγωγής
- Μεγαλύτερες ανάγκες σε χώρο για την εγκατάσταση του εξοπλισμού
- Η μεγάλη κατανάλωση του καυσίμου για τις απαιτήσεις του πλοίου επιφέρουν αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
- Μειωμένη ικανότητα ελιγμών (maneuverability)

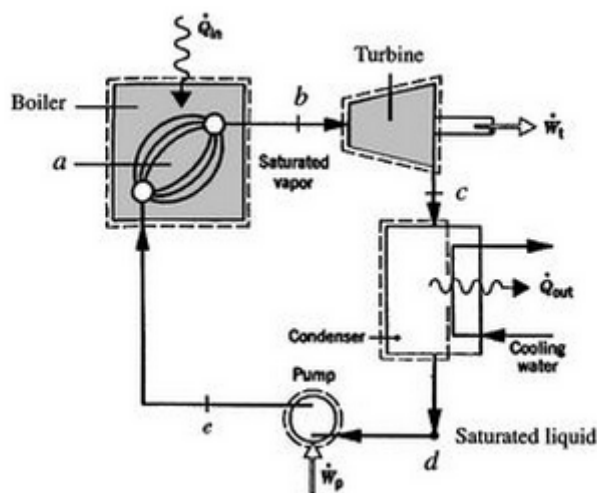
### 3.3 Διάταξη συστήματος πρόωσης με ατμοστρόβιλο

Η λειτουργία των συστημάτων πρόωσης με τη χρήση ατμοστρόβιλου στηρίζεται στον κύκλο Rankine. Η ανάγκη για υψηλότερους βαθμούς απόδοσης έχουν οδηγήσει σε παραλλαγές του κύκλου Rankine. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής μιας σύγχρονης εγκατάστασης με ατμοστρόβιλο σε ένα LNG carrier. Όπως προαναφέρθηκε το σύστημα επιδέχεται διάφορες αλλαγές για λόγους βελτιστοποίησης. Στην επόμενη ενότητα θα αναλυθούν τα κυριότερα μέρη αυτού του συστήματος.



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης ατμού  
Πηγή: [www.daedalus.gr](http://www.daedalus.gr)

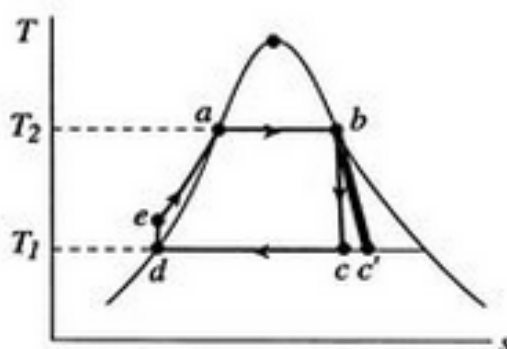
Μία περίπτωση του κύκλου Rankine παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3. Τα βασικά στοιχεία του συστήματος και οι μεταβολές κατάστασης του εργαζόμενου μέσου σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-S) θα παρουσιαστούν στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.3: Σύστημα απλού κύκλου Rankine  
Πηγή: [web.mit.edu](http://web.mit.edu)



- 1)  $d \rightarrow e$ : Υγρό αρχικής θερμοκρασίας  $T_1$  συμπιέζεται αντιστρεπτά και αδιαβατικά μέσω μίας αντλίας.
- 2)  $e \rightarrow a$ : Υπό σταθερή πίεση θερμαίνεται αντιστρεπτά στον λέβητα σε μία θερμοκρασία  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ )
- 3)  $a \rightarrow b$ : Θερμότητα προστίθεται υπό σταθερή θερμοκρασία  $T_2$  (και σταθερή πίεση) με μετατροπή από υγρό σε ατμό.
- 4)  $b \rightarrow c$ : Αδιαβατική εκτόνωση (και ισεντροπική) μέσω του στροβίλου.
- 5)  $c \rightarrow d$ : Αφαίρεση θερμότητας υπό σταθερή θερμοκρασία  $T_1$ . Συνύπαρξη μείγματος υγρού-ατμού.



Σχήμα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση διαγράμματος κύκλου Rankine συντεταγμένες T-S

### 3.4 Συνοπτική περιγραφή των επιμέρους στοιχείων

Τα κυριότερα της μηχανολογικής εγκατάστασης συστημάτων ατμού που φαίνονται και στο σχήμα 3.3 θα αναλυθούν παρακάτω.

#### Ατμολέβητες

Οι βασικές λειτουργίες του λέβητα είναι:

- η καύση του καυσίμου, με την οποία η χημική του ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα
- η μετάδοση της εκλυόμενης θερμότητας προς το νερό. Αυτή πραγματοποιείται διαμέσου της μεταλλικής επιφάνειας, που διαχωρίζει τα δύο ρευστά, δηλαδή τα καυσαέρια και το νερό που πρόκειται να ατμοποιηθεί
- η μετατροπή του νερού σε ατμό, που καλείται ατμοποίηση

Αναλυτικότερα, το πετρέλαιο εισέρχεται στην εστία, αφού πρώτα προθερμανθεί με ατμό μέσα στον προθερμαντήρα πετρελαίου. Στα LNG carriers υπάρχει η δυνατότητα καύσης και φυσικού αερίου. Γενικά υπάρχει η τάση να χρησιμοποιείται όλη η ποσότητα του φυσικού αερίου που εξατμίζεται φυσικά από τις δεξαμενές και αν υπάρχουν και άλλες ανάγκες για απαίτηση ισχύος, να συμπληρώνεται πετρέλαιο ή να εξαναγκάζεται εξατμωση φυσικού αερίου.

Ο αέρας εισάγεται στην εστία είτε μόνο με τη βοήθειά του αναρροφητικού ρεύματος της καπνοδόχου, δηλαδή με φυσικό εκλυσμό, είτε με τη βοήθεια τεχνητών μέσων, των ανεμιστήρων, δηλαδή με τεχνητό εκλυσμό. Ακόμα ο αέρας μπορεί να εισέρχεται στην εστία ψυχρός, δηλαδή με θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ή θερμός, αφού προηγουμένως περάσει μέσα από ιδιαίτερη συσκευή, τον προθερμαντήρα αέρα. Το τροφοδοτικό νερό εισέρχεται στον υδροθάλαμο, αφού πρώτα προθερμανθεί μέσα σε προθερμαντήρα νερού, που λειτουργεί με τη θερμότητα των εξαμίσεων των βοηθητικών μηχανημάτων, ή μέσα σε 2 ή 3 εναλλάκτες θερμότητας, που λειτουργούν με ατμό απομαστέυσεως από τους στρόβιλους ή μέσα στην εξαεριστική δεξαμενή ή τέλος σε οικονομητήρα, ο οποίος λειτουργεί με τη θερμότητα των καυσαερίων που εξέρχονται προς την ατμόσφαιρα. Όταν ο ατμός εξέρχεται από το λέβητα, οδεύει απευθείας προς την κατανάλωση ως υγρός ατμός ή ως ξηρός κορεσμένος ατμός ή περνά και από τον υπερθερμαντήρα, όπου υπερθερμαίνεται. Στην περίπτωση αυτή καλείται υπέρθερμος ατμός. Ο υπέρθερμος ατμός, κατά την πορεία του μέσα από το στρόβιλο, μπορεί να παραληφθεί από μία ενδιάμεση εκτονωτική βαθμίδα και να οδηγηθεί ξανά μέσα σε ιδιαίτερη συσκευή του λέβητα, που λέγεται αναθερμαντήρας, όπου αναθερμαίνεται και οδηγείται κατόπιν στην επόμενη εκτονωτική βαθμίδα του στρόβιλου με υψηλότερο θερμικό περιεχόμενο.

Τέλος, τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελούνται όλοι σχεδόν οι λέβητες είναι:

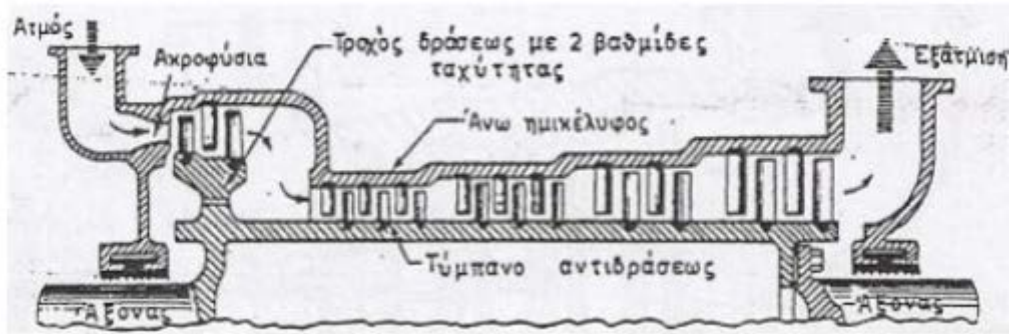
- ο θερμαντήρας: είναι ο χώρος μέσα στον οποίο συντελείται η καύση και διαμέσου του οποίου φλόγες και καυσαέρια κατευθύνονται προς την καπνοδόχο
- ο υδροθάλαμος: είναι ο χώρος του λέβητα που καταλαμβάνει το νερό
- ο ατμοθάλαμος: είναι ο χώρος που καταλαμβάνει ο ατμός

Εκτός από τα παραπάνω διακρίνονται και τα εξής μέρη:

- η εστία ή θάλαμος καύσης μέσα στην οποία γίνεται η κυρίως καύση με εισαγωγή καυσίμου. Στους κυλινδρικούς λέβητες, η εστία περικλείεται σε ένα μεταλλικό κυλινδρικό περίβλημα το οποίο ειδικότερα λέγεται κλίβανος.
- οι αυλοί είναι σωλήνες με μεγάλο μήκος και μεγάλη διάμετρο. Μέσα από τους αυλούς διέρχονται φλόγες και καυσαέρια (φλογαυλοί), οπότε περιβάλλονται από τις φλόγες και τα καυσαέρια. Σκοπός των αυλών είναι να δημιουργήσουν μεγάλη επιφάνεια μεταδόσεως της θερμότητας στο νερό μέσα σε έναν ορισμένο χώρο.
- ο καπνοθάλαμος, που συνδέει το θερμαντήρα με την καπνοδόχο
- η καπνοδόχος, που οδηγεί τα αέρια της καύσεως προς την ατμόσφαιρα

### Στρόβιλος

Οι ατμοστρόβιλοι αποτελούν το κύριο στοιχείο των συστημάτων πρόωσης με ατμό. Το βασικό τους μέρος είναι η βαθμίδα η οποία αποτελείται από ένα ζεύγος σταθερής και κινητής πτερύγωσης. Τα σταθερά πτερύγια ονομάζονται και ακροφύσια (σε ορισμένες περιπτώσεις αντί για πτερύγια υπάρχουν και πραγματικά ακροφύσια). Ο ατμός μέσω των ακροφυσίων διοχετεύεται στα πτερύγια, τα οποία βρίσκονται πάνω σε ένα περιστρεφόμενο τύμπανο. Η ενέργεια του ατμού προκαλεί την περιστροφή του ρότορα. Η τομή ενός ατμοστρόβιλου σε λειτουργία φαίνεται στο σχήμα 3.5.

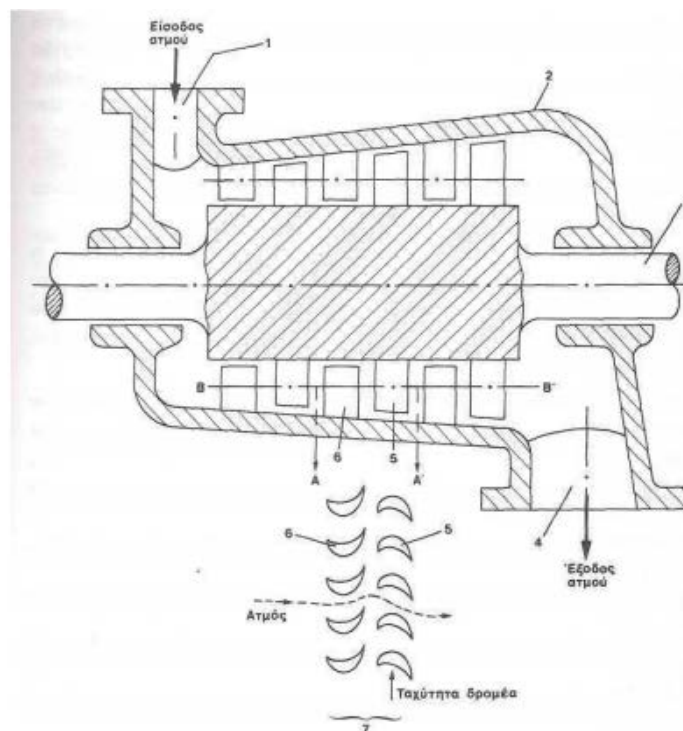


**Σχήμα 3.5:** Τομή στροβίλου

Πηγή: Διπλωματική εργασία Γιαννόπουλος Ανδρέας

Στον ατμοστροβίλο μετατρέπεται η ενέργεια του ατμού σε μηχανική ενέργεια, η οποία κινεί τον ελικοφόρο άξονα. Ο ατμός εκτονώνεται αποκτώντας μια ταχύτητα ροής. Ακολούθως πέφτει το ρεύμα ατμού σε καμπύλα πτερύγια στερεωμένα σε ένα τροχό ασκώντας εκεί μια δύναμη και μία ροπή. Ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του ατμού και είναι μέγιστος για μια ορισμένη σχετική ταχύτητα. Επειδή η ταχύτητα των πτερυγίων είναι για κατασκευαστικούς λόγους περιορισμένη, το ίδιο θα πρέπει να είναι και η ταχύτητα του ατμού. Η ταχύτητα του ατμού είναι συνάρτηση της διαφοράς πίεσης κατά την εκτόνωσή του.

Η πίεση του υπέρθερμου ατμού όμως θα έδινε ταχύτητα μεγαλύτερη από την επιθυμητή. Για το λόγο αυτό, η εκτόνωσή του θα πρέπει να γίνεται σε στάδια σε πολλές βαθμίδες. Οι βαθμίδες αποτελούνται από μια στεφάνη σταθερών και μια κινητών πτερυγίων. Το σύνολο των βαθμίδων χωρίζεται σε τμήματα που λέγονται και στροβίλοι, με ξεχωριστά κελύφη. Ένα τέτοιο τμήμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6.



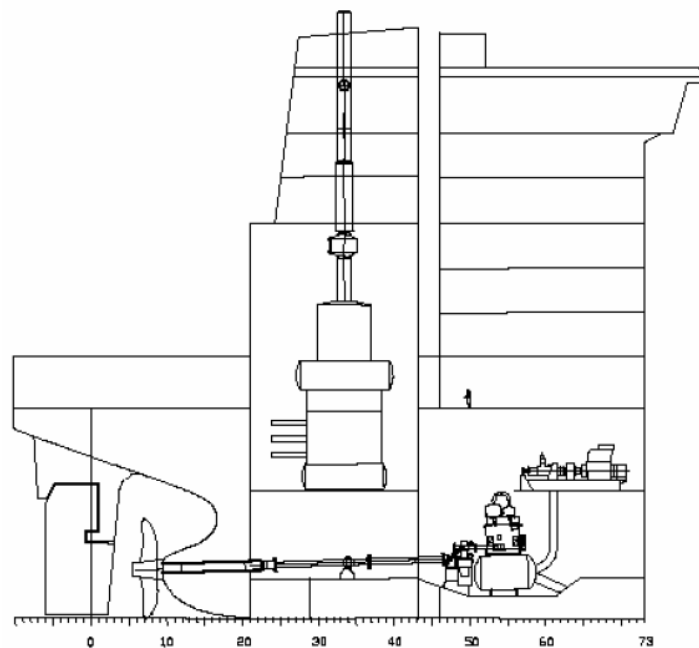
**Σχήμα 3.6:** Διακρίνονται 1)στόμιο εισόδου 2)κέλυφος 3)δρομέας 4)στομίο εξόδου 5)κινητό πτερύγιο 6)σταθερό πτερύγιο 7)ανάπτγμα μια κυλινδρικής τομής BB' που δείχνει ένα ζεύγος κινητών και σταθερών βαθμίδων, δηλαδή μία βαθμίδα.

Πηγή: Ναυτικοί ατμολέβητες, Γ.Φ. Δανήλ-Κων.Ηρ.Μιμηκοπούλου

Τρία είναι τα κύρια τμήματα: οι στρόβιλοι υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης. Κάθε τμήμα επεξεργάζεται μια ορισμένη διαφορά πίεσης. Ένα τμήμα αποτελείται από ένα σταθερό τροχό με σταθερά πτερύγια, τα οδηγία πτερύγια, που οδηγούν τον ατμό πάνω σε κινητά πτερύγια στερεωμένα στο δρομέα στροβίλου. Η μετατροπή της ενέργειας σε μια βαθμίδα γίνεται με δύο τρόπους:

- Η εκτόνωση γίνεται κυρίως στα σταθερά πτερύγια. Στην είσοδο και έξοδο των κινητών πτερυγίων υπάρχει σταθερή πίεση. Αυτοί ονομάζονται στρόβιλοι ίσης πίεσης ή στρόβιλοι δράσης
- Η εκτόνωση γίνεται και στα δύο πτερύγια. Εδώ οι πιέσεις στην είσοδο και έξοδο των κινητών πτερυγίων είναι διαφορετικές οπότε γίνεται λόγος για στροβίλους αντίδρασης. Ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων δράσης είναι κατά τι μεγαλύτερος απ' ότι στους στροβίλους αντίδρασης όσον αφορά το τμήμα των πτερυγίων. Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλους τους παράγοντες που διαμορφώνουν τον βαθμό απόδοσης, οι δύο τύποι είναι ισοδύναμοι και για το λόγο αυτό κατασκευάζονται και οι δύο.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η γενική διάταξη του μηχανοστασίου



Σχήμα 3.7: Διάταξη πλοίου με σύστημα πρόωσης με ατμό

### Συμπυκνωτής ατμού (ψυγείο)

Μετά την έξοδο από το στρόβιλο, ο ατμός υγροποιείται στον συμπυκνωτή. Υπάρχει κατά κύριο λόγο ένας συμπυκνωτής (ψυγείο) όπου καταλήγει ο ατμός του στροβίλου και αν υπάρχει ατμοκίνητη ηλεκτρογεννήτρια ή αντλίες κινούμενες με ατμό, περισσότερα ψυγεία. Στα ψυγεία υπάρχει αντλία κενού ή εγχυτήρας αέρα ώστε να επικρατεί χαμηλή πίεση. Η ψύξη γίνεται όπως είναι φυσικό με θαλασσινό νερό. Το θαλασσινό νερό εισέρχεται με φυσικό τρόπο κατά την κίνηση του πλοίου είτε με αντλία κυκλοφορίας.

### **Αφυπερθερμαντήρες**

Χρησιμεύουν για τον υποβιβασμό της θερμοκρασίας του υπέρθερμου ατμού. Συνήθως αποτελούνται από οφιοειδή σωλήνα, ο οποίος τοποθετείται μέσα στον υδροθάλαμο. Στο εσωτερικό του σωλήνα διέρχεται ο υπέρθερμος ατμός που μεταδίδει μέρος από τη θερμότητα υπερθερμάνσεως του προς το νερό του υδροθαλάμου και έτσι αφυπερθερμαίνεται.

Ο τύπος αυτός αφυπερθερμαντήρα λέγεται εσωτερικός αφυπερθερμαντήρας. Υπάρχει όμως και ο εξωτερικός με τη μορφή συνηθισμένου εναλλάκτη, από τον οποίο διέρχεται ο υπέρθερμος ατμός και αφυπερθερμαίνεται με τη βοήθεια του τροφοδοτικού νερού πριν αυτό εισέλθει στον λέβητα. Έτσι και το τροφοδοτικό νερό προθερμαίνεται ανάλογα. Ο αφυπερθερμος ατμός που εξέρχεται από τον αφυπερθερμαντήρα, είναι και αυτός υπέρθερμος χαμηλότερης θερμοκρασίας ή κορεσμένος, και οδηγείται στην κατανάλωση για την κίνηση βοηθητικών μηχανημάτων της εγκατάστασης.

### **Προθερμαντήρες αέρα**

Χρησιμεύουν για την προθέρμανση του καυσιγόνου αέρα. Τοποθετούνται συνήθως στην έξοδο των καυσαερίων, δηλαδή πριν την καπνοδόχο. Αποτελούνται, στην απλούστερη διάταξη τους, από δέσμη αυλών στο εσωτερικό των οποίων διέρχονται καυσαέρια. Στο εξωτερικό τους κυκλοφορεί ο αέρας που οδηγείται στη συνέχεια στην εστία. Με αυτό τον τρόπο μέρος από τη θερμότητα, που με τα καυσαέρια θα διοχετεύονταν στην ατμόσφαιρα, εισάγονται ξανά στην εστία περιορίζοντας έτσι την απώλεια θερμότητας.

### **Προθερμαντήρες τροφοδοτικού νερού**

Χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση του τροφοδοτικού νερού. Αποτελούνται, συνήθως, από δέσμες αυλών, στο εσωτερικό των οποίων κυκλοφορεί το νερό που κατευθύνεται προς το λέβητα. Εξωτερικά των αυλών κυκλοφορούν οι εξατμίσεις των βοηθητικών μηχανημάτων της εγκατάστασης. Υπάρχουν δύο είδη προθερμαντήρων: 1) επιφάνειας, στους οποίους η θερμότητα μεταβιβάζεται από τον ατμό στο νερό μέσω του τοιχώματος σωλήνων και επομένως τα δύο ρευστά δεν αναμιγνύονται, και 2) ανάμιξης, στους οποίους ο ατμός αναμιγνύεται με το νερό προθερμαίνοντας το. Κατά κύριο λόγο σε συστήματα ατμού, ο ένας προθερμαντήρας είναι ανάμιξης και χρησιμεύει ταυτόχρονα και ως απαιρωτής. Στον απαιρωτή πρέπει να απαλλαγεί από τον αέρα που περιέχει. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ατμού που έρχεται από την έξοδο του στροβίλου.

### **Στροβιλογεννήτρια**

Η στροβιλογεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ισχύ από την κίνηση του ρότορα σε ηλεκτρική ισχύ. Ο ρότορας κινείται με τη χρήση υπέρθερμου ατμού. Το συμπύκνωμα από το στρόβιλο της γεννήτριας οδηγείται στα βοηθητικά ψυγεία. Η χρήση στροβιλογεννήτριας δεν συνεπάγεται την απαγόρευση χρήσης γεννητριών κινούμενων με καύσιμο diesel.

### **Καταναλωτές ατμού**

Τέλος, θα γίνει λόγος για καταναλωτές που μπορεί να εξυπηρετούνται από την παραγωγή ατμού. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : ΠΡΟΩΣΗ ΜΕ ΑΤΜΟ

- Καταναλωτές που συμμετέχουν στη λειτουργία του συστήματος  
Περιλαμβάνουν τους προθερμαντήρες πετρελαίου, που προθερμούν το καύσιμο πριν αυτό εισέλθει στην εστία ώστε να γίνεται λεπτόρρευστο και να επιτυγχάνεται η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη επαφή των μορίων του με τα μόρια του αέρα, τους εξαμιστές του υγροποιημένου φυσικού αερίου και τους προθερμαντήρες αερίου.
- Εξωτερικοί καταναλωτές  
Πρόκειται για το θερμαντήρα γλυκού νερού, που χρησιμοποιείται στις ενδειατήσεις, τους θερμαντήρες λιπαντικών και τους θερμαντήρες καυσίμου πετρελαίου

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ & ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΩΩΣΗΣ**

### **4.1 Γενικά στοιχεία**

Παρότι φαινομενικά ο υπολογισμός της αντίστασης των μελετώμενων πλοίων δεν περιέχεται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, είναι πολύ σημαντικός για τον υπολογισμό των ενεργειακών δεικτών EEDI-EEOI και την επεξεργασία τους. Γνωρίζοντας την αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης (λαμβάνοντας υπ' όψιν και τη συμμετοχή της έλικας) και κατά συνέπεια και η ταχύτητα του πλοίου. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται για το ηλεκτροκίνητο πλοίο τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στην ενότητα 4.2.

### **4.2 Υπολογισμός ολικής αντίστασης**

Η εκτίμηση της αντίστασης είναι απαραίτητη κατά το προκαταρκτικό στάδιο της σχεδίασης του πλοίου. Αν και η τελική τιμή της αντίστασης είναι δυνατόν να προσεγγιστεί μόνο πειραματικά κατά την εκτέλεση των δοκιμών ανοικτής θάλασσας (sea trials), είναι απαραίτητη η γνώση της σε αυτό το σημείο. Γνωρίζοντας την αντίσταση και με την χρήση άλλων δεδομένων (διάμετρος έλικας, αριθμός πτερυγίων) που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια θα μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα του πλοίου κάθε χρονική στιγμή ανάλογα με την ισχύ στον ελικοφόρα άξονα. Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες συστηματικές σειρές αντίστασης:

1. B.S.R.A
2. FORMDATA
3. LAP-KELLER

Οι υπολογισμοί θα γίνουν για ένα εύρος ταχυτήτων 4kn μικρότερων από την υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου και 1kn μεγαλύτερου από αυτήν. Στον πίνακα 4.1. δίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου.

<b>Ship's Particulars</b>		
Length per Perpendiculars ( $L_{pp}$ )	(m)	283.2
Load Waterline Length ( $L_{wl}$ )	(m)	287.66
Breadth Moulded (B)	(m)	44
Depth Moulded (D)	(m)	26
Design Draft (T)	(m)	12.52
Deadweight (DWT)	(t)	90327.7
Displacement ( $\Delta$ )	(t)	122869.6
Wetted Surface Area (WSA)	( $m^2$ )	10838
Longitudinal Centre of Buoyancy (from A.P.) (LCB)	(m)	140.74
(Block coefficient) $C_B$	-	0.768
(Prismatic coefficient) $C_P$	-	0.869
(Waterplane coefficient) $C_{WP}$	-	0.774

**Πίνακας 4.1:** Βασικές διαστάσεις υπό μελέτη πλοίου

Οι διαστάσεις του πίνακα 4.1 έχουν μετρηθεί από το σχέδιο γενικής διάταξης του πλοίου ή αναφέρονται στο trim & stability booklet. Τέλος, θεωρούμε μέση θερμοκρασία νερού ίση με 15°C. Η πυκνότητα του νερού σε αυτή τη θερμοκρασία είναι  $\rho=104.61 \text{ kp}\cdot\text{sec}^2 / \text{m}^4$  και το κινηματικό ιξώδες είναι  $\nu=1.18831\cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

#### 4.2.1 Μέθοδος B.S.R.A.

Τις μεθοδικές σειρές B.S.R.A. αρχικά τις αποτελούσαν ανεξάρτητες ομάδες μοντέλων, σε κάθε μία από τις οποίες μια πατρική μορφή μεταβαλλόταν γεωμετρικά. Οι πατρικές μορφές είχαν τις εξής τιμές του  $C_B$ : 0.65, 0.70, 0.75, 0.80. Για να αυξηθεί η χρησιμότητα των ανεξαρτήτων ομάδων και για να υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας με παρεμβολή άλλων μορφών εκτός των πατρικών, θεωρήθηκαν τέσσερις μορφές σαν βασικές. Από τις τέσσερις βασικές μορφές σχεδιάστηκαν αδιάστατες γεωμετρικές καμπύλες των συντεταγμένων των ισάλων, οι οποίες καλύπτουν μια περιοχή των τιμών  $C_B$  από 0.625 έως 0.825. Κατόπιν, έγινε νέα επέκταση των σειρών και οι αδιάστατες συντεταγμένες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τιμές του  $C_B$  από 0.525 έως 0.875 για κανονική ή βολβοειδή μορφή πλήρωσης. Η μεθοδολογία η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια, καθώς και τα διαγράμματα και τα σχήματα, περιλαμβάνονται στο φυλλάδιο: 'Οδηγίες χρήσεως μεθοδικών σειρών B.S.R.A. για τον υπολογισμό της αντίστασης πρόωσης'.

Η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης του πλοίου βρίσκεται πρύμνηθεν της μέσης τομής του πλοίου κατά 0.86m και έτσι κατά σύμβαση θα λαμβάνει αρνητικό πρόσημο. Οπότε για τη μέθοδο B.S.R.A:

$$LCB = -0.3\% L_{PP}$$

Τα αποτελέσματά θα αναφέρονται σε πλοία με τις ακόλουθες διαστάσεις όπως προδιαγράφει αυτή η μέθοδος:

$$L_{pp} = 121.92\text{m}, B = 16.76\text{m}, T = 6.71\text{m}, C_B \geq 0.725$$

- Τιμή του συντελεστή αντίστασης © για τη βασική μορφή του πλοίου (πίνακας 4.2):

$V_s$ [kn]	$V$ [kn]	©
15.9	10.43	0.667
16.9	11.09	0.669
17.9	11.75	0.685
18.9	12.40	0.708
19.9	13.06	0.728
20.9	13.71	0.765

Πίνακας 4.2: Αρχική τιμή συντελεστή © για τις ταχύτητες 15.9kn-20.9kn

Στην πρώτη στήλη του πίνακα 4.2 είναι οι ταχύτητες του υπό μελέτη πλοίου για τις οποίες εκτελείται η μέθοδος, στη δεύτερη στήλη οι ταχύτητες που αντιστοιχούν στο βασικό πλοίο της μεθόδου. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την αναγωγή του υπό μελέτη πλοίου στο πρότυπο. Η σχέση που τις συνδέει είναι:

$$V = V_S \cdot \sqrt{\frac{L_{PP\text{πρωτ}}}{L_{PP\text{υπόμελέτη}}}}, \text{ με } L_{PP\text{πρωτ}} = 121.92\text{m} \text{ \& } L_{PP\text{υπόμελέτη}} = 283.2\text{m}$$

Στην τελευταία στήλη, οι τιμές του συντελεστή αντίστασης © προκύπτουν από τα



διαγράμματα των σχημάτων 7β και 7γ (σελ. 17-18) του αντίστοιχου φυλλαδίου για βολβοειδή πλώρη.

- Διόρθωση του συντελεστή αντίστασης © για τους λόγους B/T και  $L/V^{1/3}$  (πίνακας 4.3):

Το υπό μελέτη πλοίο έχει όπως είναι αναμενόμενο διαφορετικούς λόγους B/T (διόρθωση  $\delta_1$ ) και  $L/V^{1/3}$  (διόρθωση  $\delta_2$ ) από το πρότυπο. Συγκεκριμένα:

$$\frac{B}{T} = 3.514m$$

$$\frac{L}{V^{1/3}} = 5.744m$$

Για το γεγονός αυτό ο συντελεστής ολικής αντίστασης © υπόκειται σε διόρθωση:

	B/T	$L/V^{1/3}$
$V_s$ [kn]	$\delta_1$	$\delta_2$
15.9	1.01	1.02
16.9	1.06	1
17.9	1.01	0.99
18.9	1	1
19.9	1	1
20.9	1	1

**Πίνακας 4.3:** Διορθώσεις συντελεστή © για λόγο B/T και λόγο λυγηρότητας

Η διόρθωση για το B/T αντλείται από τα σχήματα 12 & 13 του φυλλαδίου (σελ. 24-25) και από τα σχήματα 15 & 16 (σελ. 27-28) αντλείται η διόρθωση για τη μεταβολή στο λόγο λυγηρότητας.

- Διόρθωση του συντελεστή αντίστασης © για τη διαμήκη θέση του κέντρου άντωσης (πίνακας 4.4):

Όπως περιγράφεται από τη μέθοδο η διαμήκης θέση του LCB για το πλοίο βασικής μορφής είναι +2% πλώρα από τη μέση τομή, ενώ για το υπό μελέτη πλοίο είναι -0.3%(πρύμνηθεν). Η απόκλιση από τη θέση της βασικής μορφής είναι επομένως +2.3% και η απαραίτητη διόρθωση για το LCB( $\delta_3$ ) λαμβάνεται από το διάγραμμα του σχήματος. Από τα σχήματα 19-21 του φυλλαδίου (σελίδα 32-34) προκύπτουν οι τιμές για κάθε ταχύτητα του υπό μελέτη πλοίου (πίνακας 4.4)

$V_s$ [kn]	$\delta_3$
15.9	0.86
16.9	0.89
17.9	0.93
18.9	0.94
19.9	0.98

20.9	1
------	---

**Πίνακας 4.4:** Διόρθωση συντελεστή © για το LCB

- Ολική διόρθωση του συντελεστή αντίστασης © (πίνακας 4.5):

Η ολική διόρθωση του © είναι το γινόμενο των έως τώρα υπολογισθέντων διορθώσεων που δίνονται στους πίνακες ( δ<sub>1</sub>, δ<sub>2</sub>, δ<sub>3</sub>). Έτσι δημιουργείται ο πίνακας 4.5 για κάθε ταχύτητα υπολογισμού του υπό μελέτη πλοίου.

V <sub>s</sub> [kn]	V [kn]	© <sub>121.92</sub>
15.9	10.43	0.591
16.9	11.09	0.631
17.9	11.74	0.637
18.9	12.40	0.666
19.9	13.06	0.713
20.9	13.71	0.765

**Πίνακας 4.5:** Ολική διόρθωση συντελεστή ©

Η πρώτη στήλη αντιστοιχεί στις ταχύτητες του υπό μελέτη πλοίου, η δεύτερη στις αναγόμενες ταχύτητες του προτύπου και η τρίτη στήλη είναι ο συντελεστής διόρθωσης. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής αυτός αντιστοιχεί στο πρότυπο (δείκτης L<sub>PP</sub>=121.92) και θα πρέπει να μεταβληθεί.

- Ολική διόρθωση του συντελεστή αντίστασης © (πίνακας 4.6):

Όπως προαναφέρθηκε πρέπει να γίνει μια διόρθωση για το πραγματικό μήκος του πλοίου(δ<sub>4</sub>). Για το λόγο αυτό πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής βρεχόμενης επιφάνειας S:

$$S = 1.88 + 0.941 \cdot C_B + 0.766 \cdot \frac{L_{BP}}{\nabla^{1/3}} - 0.086 \cdot \frac{L_{BP}}{B} = 6.45$$

V <sub>s</sub> [kn]	V [kn]	δ <sub>4</sub>	C <sub>121.92 + δ<sub>4</sub></sub>
15.9	10.432	-0.0470	0.544
16.9	11.089	-0.0450	0.586
17.9	11.745	-0.0520	0.585
18.9	12.401	-0.0480	0.618
19.9	13.057	-0.0460	0.667
20.9	13.713	-0.0430	0.722

**Πίνακας 4.6:** Διόρθωση του συντελεστή αντίστασης © λόγω διαφοράς μήκους

Οι τιμές της διόρθωσης δ<sub>4</sub> προκύπτουν από το σχήμα 29 (σελ. 41) του σχετικού φυλλαδίου.

- Διόρθωση συντελεστή αντίστασης © σύμφωνα με τη γραμμή τριβής I.T.T.C 1957 (πίνακας 4.7):

Οι τιμές που εμφανίζονται στους παραπάνω πίνακες για το συντελεστή αντίστασης © αντιστοιχούν στον υπολογισμό της αντίστασης τριβής κατά Froude.

Με χρήση άλλης μία διόρθωσης ( $\delta_5$ ) η αντίσταση αυτή θα μπορεί να αναχθεί στην αντίσταση σύμφωνα με τη γραμμή τριβής I.T.T.C. 1957 (πίνακας 4.7)

$V_s$ [kn]	V [kn]	$C_{121.92} + \delta_4$	$\delta_5$	$C_{ITTC}$
15.9	10.432	0.544	0.135	0.409
16.9	11.089	0.586	0.133	0.453
17.9	11.745	0.585	0.129	0.456
18.9	12.401	0.618	0.126	0.492
19.9	13.057	0.667	0.123	0.544
20.9	13.713	0.722	0.1220	0.600

**Πίνακας 4.7:** Ολικός συντελεστής αντίστασης για το υπό μελέτη πλοίο

- Αντίσταση-Συντελεστής τριβής με μέθοδο B.S.R.A. (πίνακας 4.8):

Πλέον μπορεί να υπολογιστεί η ολική αντίσταση του πλοίου  $R_T$ , ο συντελεστής ολικής αντίστασης  $C_{TL}$ , και η απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης EHP. Οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν είναι:

$$V \left[ \frac{m}{s} \right] = 0.5144 \cdot V [kn]$$

$$R_T [kp] = C_{ITTC} \cdot \rho \cdot V_S^2 \cdot V^{\frac{2}{3}}, V_S \ \& \ V \ \sigma\epsilon \ \left[ \frac{m}{s} \right] \ \text{και} \ \rho \ \sigma\epsilon \ \left[ \frac{kp \cdot s^4}{m^4} \right]$$

$$F_n = \frac{V_S}{\sqrt{gL_{PP}}}, V_S \ \sigma\epsilon \ \left[ \frac{m}{s} \right], \ g \ \sigma\epsilon \ \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

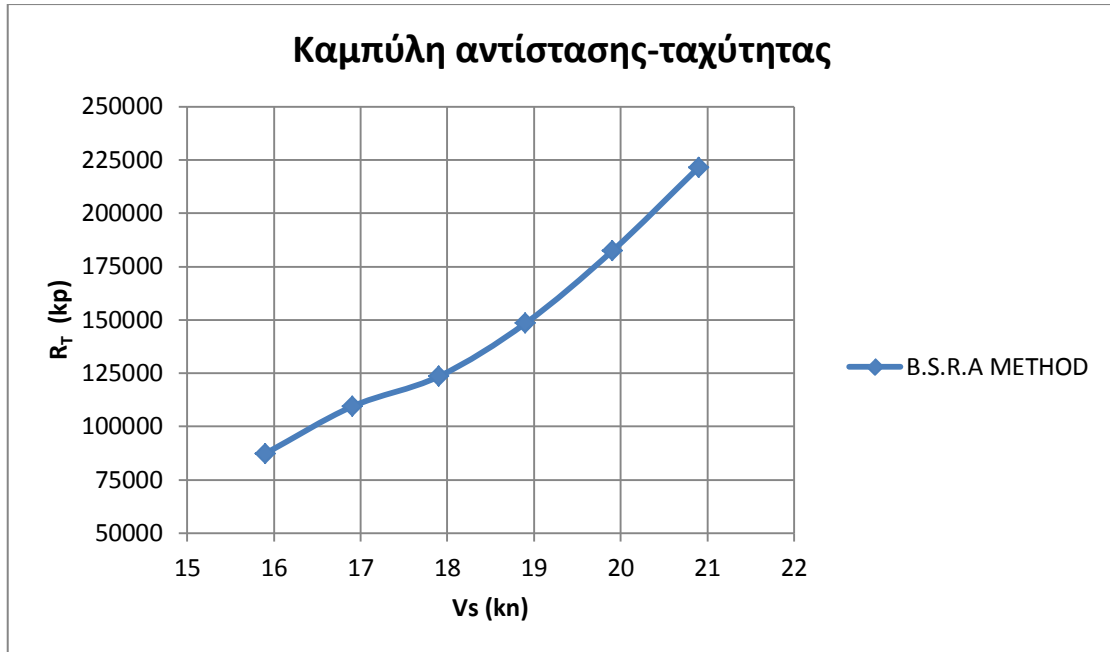
$$EHP [PS] = R_T \cdot \frac{V_S}{75}, V_S \ \sigma\epsilon \ \left[ \frac{m}{s} \right] \ \text{και} \ R_T \ \sigma\epsilon \ [kp]$$

$$C_{TL} [10^3] = 10^3 \cdot \frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho \cdot V_S^2 \cdot WSA}, \ \text{με μονάδες όπως παραπάνω}$$

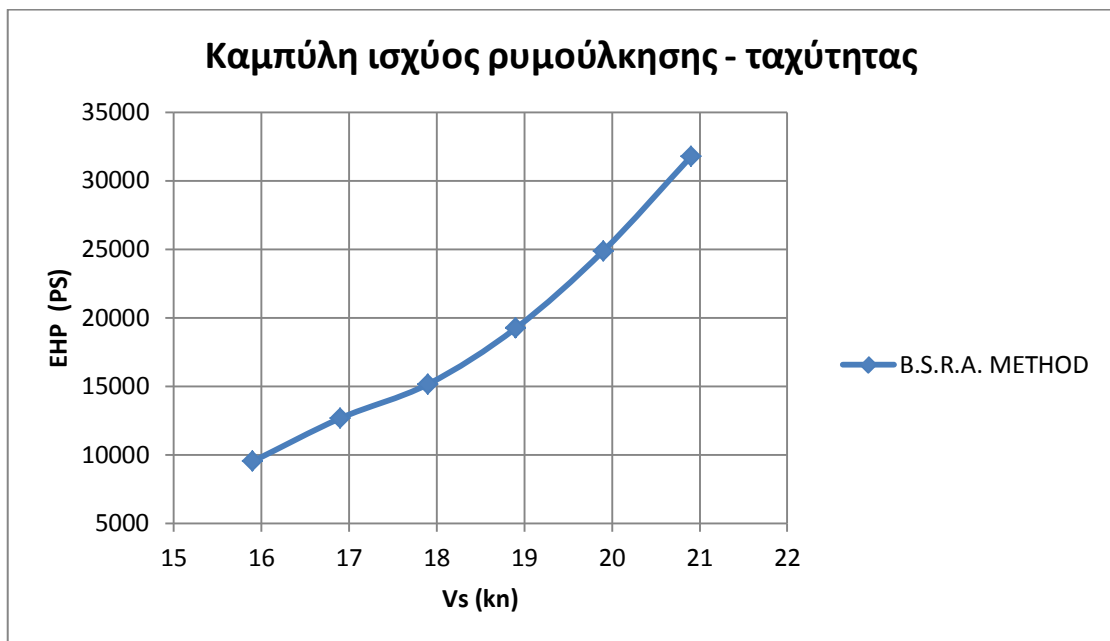
$V_s$ [kn]	$V_s$ [m/s]	$C_{ITTC}$	$R_T$ [kp]	$F_n$	EHP [PS]	$C_{TL} \cdot 10^3$
15.9	8,179	0,409	87379,49	0,155	9528,98	2,304
16.9	8,693	0,453	109383,74	0,165	12678,83	2,553
17.9	9,208	0,456	123483,81	0,175	15160,12	2,569
18.9	9,722	0,492	148394,21	0,184	19236,16	2,769
<b>19.9</b>	<b>10,237</b>	<b>0,544</b>	<b>182225,16</b>	<b>0,194</b>	<b>24871,45</b>	<b>3,068</b>
20.9	10,751	0,600	221511,35	0,204	31752,79	3,381

**Πίνακας 4.8:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέθοδο αντίστασης B.S.R.A

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν με μορφή διαγραμμάτων τα αποτελέσματα του πίνακα 4.8



Διάγραμμα 4.1: Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (B.S.R.A)



Διάγραμμα 4.2: Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (B.S.R.A)

#### 4.2.2 Μέθοδος FORM-DATA

Με τη μέθοδο αυτή, η οποία ξεκίνησε στο Πολυτεχνείο Δανίας και δημοσιεύτηκε στην πιο πρόσφατη μορφή της από τους Guldhammer και Harvald το 1974, γίνεται προσπάθεια συνδυασμού των αποτελεσμάτων των μεθοδικών σειρών Taylor, 60, S.S.P.A. ,N.P.L. όπως και των αποτελεσμάτων του Lar. Τα αποτελέσματα της μεθόδου έχουν ταξινομηθεί σύμφωνα με το λόγο μήκους-εκτοπίσματος  $L/V^{1/3}$  και τον πρισματικό συντελεστή  $C_p$ . Τα κύρια διαγράμματα της μεθόδου δίνουν καμπύλες μεταβολής του συντελεστή υπολοίπων αντιστάσεων  $C_R$  με τους συντελεστές  $L/V^{1/3}$ ,  $C_p$  και  $V/L^{1/2}$ . Αρχικά θα υπολογιστεί η αντίσταση για την ταχύτητα υπηρεσίας και κατόπιν για άλλες ταχύτητες περί την ταχύτητα υπηρεσίας. Τα διαγράμματα και τα σχήματα για τα οποία γίνεται λόγος σε αυτήν την ενότητα βρίσκονται στο φυλλάδιο: 'Μέθοδος FORMDATA για τον υπολογισμό της αντίστασης του πλοίου'.

Για το υπό μελέτη πλοίο ο λόγος λυγηρότητας  $L/V^{1/3}=5.744$ . Χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σχημάτων 4&5(σελ. 13-14) για λόγους  $L/V^{1/3}=5.5$  &  $L/V^{1/3}=6.0$  και με  $F_n=0.194$  και  $C_p=0.774$  προκύπτει για το συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης :

$$(10^3 C_R)_1 = 1.080$$

- Διόρθωση συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης  $(10^3 C_R)_1$  για το λόγο  $B/T$

Όπως προαναφέρθηκε λόγω διαφορετικού λόγου  $(\frac{B}{T} = 3.514)$  του υπό μελέτη πλοίου από το πρότυπο  $(\frac{B}{T} = 2.50)$  πρέπει να γίνει διόρθωση. Η διόρθωση δίνεται από τη σχέση:

$$(10^3 C_{R2}) = (10^3 C_{R1}) + 0.16 \cdot \left( \frac{B}{T} - 2.5 \right)$$

Άρα ο συντελεστής γίνεται :

$$(10^3 C_R)_2 = 1.242$$

- Διόρθωση συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης  $(10^3 C_R)_2$  για τη θέση του LCB

Όπως και προηγουμένως λόγω διαφορετικής θέσης του κέντρου βάρους της άντωσης του υπό μελέτη από το πρότυπο ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης πρέπει να διορθωθεί. Στο υπό μελέτη πλοίο  $LCB = -0.3\%$  πρύμνηθεν της μέσης τομής ενώ στο πρότυπο από το σχήμα 10(σελ.18) προκύπτει  $LCB_{standard} = 0.834\%$ . Τέλος από το σχήμα 11 του φυλλαδίου (σελ.18) προκύπτει ο λόγος

$$\frac{\partial 10^3 C_R}{\partial LCB} = 0.170$$

Τέλος, η διόρθωση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$(10^3 C_R)_3 = (10^3 C_R)_2 + \frac{\partial 10^3 C_R}{\partial LCB} \cdot \Delta LCB$$

Οπότε:

$$(10^3 C_R)_3 = 1.240$$

- Διόρθωση συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης  $(10^3 C_R)_3$  λόγω εγκάρσιων τομών  
Δεν απαιτείται διόρθωση, αφού ο συντελεστής Froude δεν ανήκει στο εύρος τιμών για τη συγκεκριμένη μετατροπή.
- Διόρθωση συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης  $(10^3 C_R)_3$  λόγω βολβοειδούς πλώρης  
Η διόρθωση(C) για τη μορφή της πλώρης δίνεται από το διάγραμμα (σελ 3).  
Ισχύει:

$$(10^3 C_R)_4 = (10^3 C_R)_3 - C, \text{ όπου } C=0$$

Οπότε:

$$(10^3 C_R)_4 = 1.240$$

- Καθορισμός συντελεστή αντίστασης τριβής  $C_F$   
Κατά την αναλυτική εργασία κατασκευής των διαγραμμάτων της μεθόδου FORMDATA χρησιμοποιήθηκε για την αντίσταση τριβής η γραμμή τιμών της I.T.T.C. 1957. Η αναλυτική μορφή της I.T.T.C. είναι:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2}$$

όπου:

$$R_n = V_S \cdot \frac{L_{WL}}{v}$$

Άρα για το υπό μελέτη πλοίο προκύπτει  $R_n = 2.48 \times 10^9$

Οπότε:

$$(10^3 C_F)_1 = 1.376$$

- Διόρθωση λόγω παρελκόμενων  
Πρέπει να γίνει διόρθωση του  $C_F$  για τα παρελκόμενα. Η διόρθωση γίνεται με απλή προσαύξησή του ανάλογα με τη βρεχόμενη επιφάνεια των παρελκόμενων. Θεωρούμε με αρκετή ακρίβεια ότι ο λόγος της συνολικής βρεχόμενης επιφάνειας ως προς τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας είναι :  $\frac{S_1}{S} = 1.018$ . Η διόρθωση δίνεται από τον τύπο :

$$(10^3 C_F)_2 = (10^3 C_F)_1 \cdot \frac{S_1}{S}$$

Οπότε:

$$(10^3 C_F)_2 = 1.396$$

- Διόρθωση λόγω συντελεστή συσχετίσεως

Ο συντελεστής πρέπει να διορθωθεί και για τις επιδράσεις της τραχύτητας και της κλίμακας με τον συντελεστή συσχετίσεως  $C_A$ . Για το πλοίο είναι ( $10^3 C_A=0.104$ ). Η τελική τιμή του συντελεστή αντίστασης τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$(10^3 C_F)_3 = (10^3 C_F)_2 + 10^3 C_A$$

Οπότε:

$$(10^3 C_F)_3=1.500$$

- Αντίσταση-συντελεστής τριβής με μέθοδο FORMDATA

Πλέον μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής ολικής αντίστασης  $C_T$

$$(10^3 C_T)_1 = (10^3 C_F)_3 + (10^3 C_R)_4$$

Οπότε:

$$(10^3 C_T)_1=2.741$$

Θα πραγματοποιηθεί μία τελευταία διόρθωση για συνθήκες υπηρεσίας. Οι τιμές των συντελεστών αντίστασης που υπολογίστηκαν προηγουμένως με τη μέθοδο FORMDATA ισχύουν για κατάσταση δοκιμών των πλοίων, δηλαδή για ιδανικές συνθήκες ανέμου και κυματισμού, βαθύ προστατευμένο νερό και καθαρή γάστρα. Για τη μέση πραγματική κατάσταση υπηρεσίας προτείνεται μία προσαύξηση της τάξης του 20% στον συντελεστή ολικής αντίστασης. Οπότε:

$$(10^3 C_T)_2=3.289$$

Τέλος, όπως και προηγουμένως θα υπολογιστεί η ολική αντίσταση  $R_T$  και η ισχύς ρυμούλκησης EHP.

$$R_T [kp] = \frac{1}{2} \cdot (C_T)_2 \cdot \rho \cdot V_s^2 \cdot S \quad \& \quad EHP [PS] = \frac{R_T \cdot V_s}{75}$$

με  $V_s$  σε [kn],  $\rho=104.59$  [kp x s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>]

Οπότε:

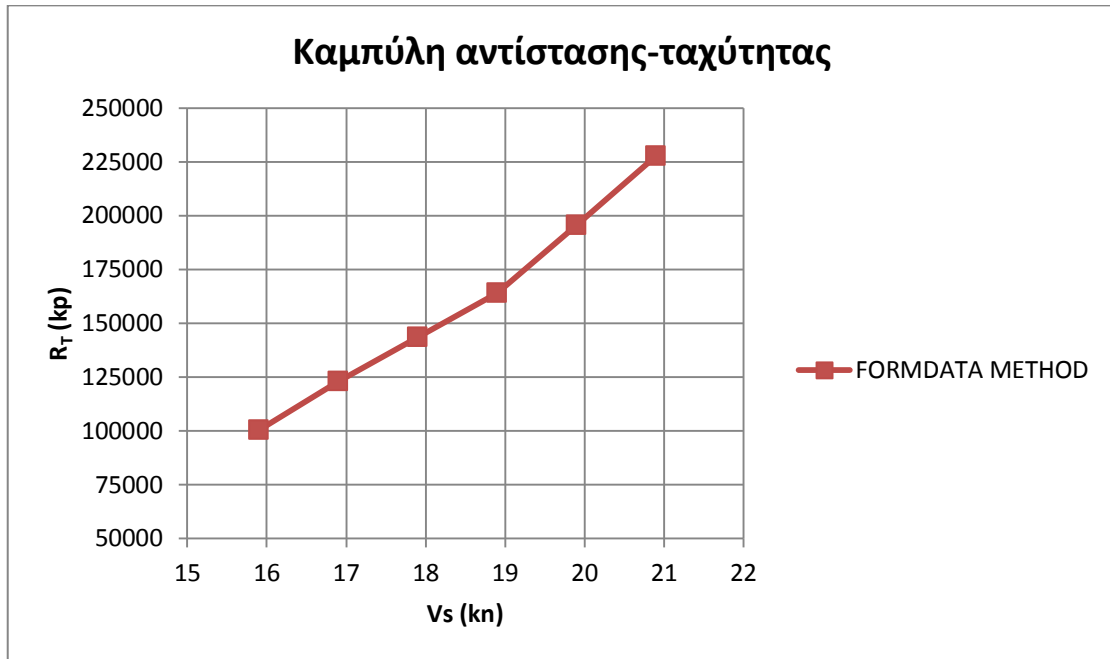
$$R_T=195361kp \quad \& \quad EHP=26664PS$$

Στον πίνακα 4.9 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλο το εύρος των ταχυτήτων που μελετήθηκαν.

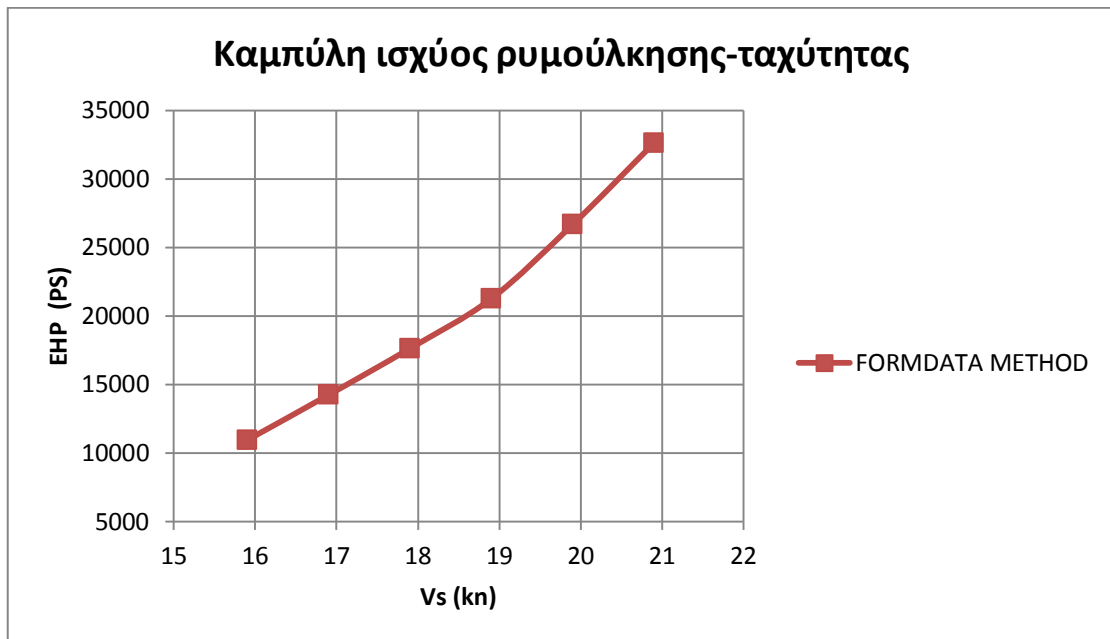
$V_s$ [kn]	$(10^3 C_T)$	$R_T$ [kp]	EHP [PS]	$F_n$
15.9	2.646	100348	10943	0.155
16.9	2.867	122847	14239	0.165
17.9	2.987	143581	17627	0.175
18.9	3.060	163951	21253	0.184
<b>19.9</b>	<b>3.289</b>	<b>195361</b>	<b>26664</b>	<b>0.194</b>
20.9	3.472	227482	32609	0.204

Πίνακας 4.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέθοδο αντίστασης FORMDATA

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν με μορφή διαγραμμάτων τα αποτελέσματα του πίνακα 4.9.



Διάγραμμα 4.3: Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (FORMDATA)



Διάγραμμα 4.4: Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (FORMDATA)



### 4.2.3 Μέθοδος Lap-Keller

Το 1954 ο Lap δημοσίευσε την εργασία του για την εκτίμηση της αντίστασης ρυμούλκησης μονέλικων πλοίων (φορηγών ή επιβατηγών) με βάση σχετικές δοκιμές μοντέλων 'σύγχρονων' -για την εποχή του- πλοίων που έγιναν στη δεξαμενή ρυμουλκήσεως N.S.M.B. Τα διαγράμματα υπολογισμού του Lap επεκτάθηκαν το 1973 από τον Keller για μεγάλα, αργά πλοία με μεγάλο  $C_B$ .

Η συνολική αντίσταση του πλοίου  $R_T$  αποτελείται από την αντίσταση τριβής  $R_F$  και τις υπόλοιπες αντιστάσεις  $R_R$  (διορθωμένες με τον συντελεστή διορθώσεως  $k_1$  για την επίδραση του λόγου  $L/B$ ). Αν  $B/T > 2.4$ , η συνολική αντίσταση διορθώνεται με τον συντελεστή  $k_2$ .

Η μελέτη θα γίνει για την υπηρεσιακή ταχύτητα ενώ στη συνέχεια θα παρατεθούν τα αποτελέσματα για όλο το εύρος των ταχυτήτων. Σημειώνεται ότι τα διαγράμματα και τα σχήματα για τα οποία γίνεται λόγος σε αυτήν την ενότητα περιέχονται στο φυλλάδιο: 'Υπολογισμός αντίστασης με τη μέθοδο Lap/Keller'

- Υπολογισμός υπόλοιπης αντίστασης  $R_R$

Η υπόλοιπη αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$R_R = \zeta_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_M$$

όπου

- 1)  $A_M$  είναι η επιφάνεια της μέσης τομής και δίνεται από τον τύπο

$$A_M = C_M \cdot B \cdot T$$

- 2)  $\zeta_r$  συντελεστής υπόλοιπων αντιστάσεων

- 3)  $V$  [kn] και  $\rho$  [ $kp \cdot \frac{s^2}{m^2}$ ], η ταχύτητα του πλοίου και η πυκνότητα του νερού αντίστοιχα.

Με  $C_p=0.774$  &  $LCB=-0.3\%$   $L_{pp}$  προκύπτει από το σχήμα της σελίδας 2 ότι το πλοίο ανήκει στην κατηγορία E και επομένως θα χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα της κατηγορίας αυτής για τους υπολογισμούς.

Για τον υπολογισμό του συντελεστή  $\zeta_r$  θα πρέπει να υπολογιστεί ο αριθμός  $\frac{V_S}{\sqrt{C_{pd} \cdot L_d}}$  που αποτελεί ένα είδος αριθμού Froude.

Ο όρος  $C_{pd} = \frac{V}{C_M \times L_d \times B \times T}$  αποτελεί τον πρισματικό συντελεστή βασισμένο στο

μήκος  $L_d=1.01 \times L_{pp}$ .

Για το υπό μελέτη πλοίο:

$$L_d=286.032m, C_{pd}=0.767 \text{ και } \frac{V_S}{\sqrt{C_{pd} \cdot L_d}} = 0.691$$

Από το σχήμα 6 του φυλλαδίου (σελ. 4) προκύπτει :

$$10^3 \zeta_r = 26.80$$

Κατόπιν από το σχήμα 7 του φυλλαδίου (σελ. 4) προκύπτει ο συντελεστής  $k_1=1.19$ . Ο συντελεστής διόρθωσης  $k_2$  υπάρχει επειδή ο λόγος  $B/T > 2.4$ . Ο συντελεστής  $k_2$  δίνεται από τη σχέση:

$$k_2 = 1 + 0.5 \cdot \left( \frac{B}{T} - 2.4 \right)$$

Τέλος, η διορθωμένη υπόλοιπη αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$R_R \cdot k_1 \cdot k_2 = \zeta_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_S^2 \cdot A_M \cdot k_1 \cdot k_2, \text{ με } V_S [m/s]$$

Οπότε:

$$R_R \cdot k_1 \cdot k_2 = 88132kp$$

- Υπολογισμός αντίστασης τριβής  $R_F$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης τριβής πρέπει να βρεθεί η ποσότητα:

$$L_d \cdot V_S, \text{ με } V_S \text{ σε } kn.$$

Από το διάγραμμα 8 του φυλλαδίου (σελ. 4) προκύπτει ο συντελεστής τριβής  $C_F$  και από τον πίνακα I (σελ. 2) προκύπτει ο συντελεστής συσχέτισης  $C_A$ .

Οπότε:

$$10^3 C_F = 1.36 \text{ \& } 10^3 C_A = 0$$

Η αντίσταση τριβής προκύπτει από τον τύπο:

$$R_F = (C_F + C_A) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_S^2 \cdot S$$

Οπότε:

$$R_F = 114172kp$$

- Αντίσταση-ισχύς ρυμούλκησης με μέθοδο Lap-Keller

Η συνολική αντίσταση του πλοίου τελικά είναι

$$R_T = R_F + R_R \cdot k_1 \cdot k_2$$

και η απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης EHP υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$EHP = \frac{R_T \cdot V_S}{75}$$

Οπότε:

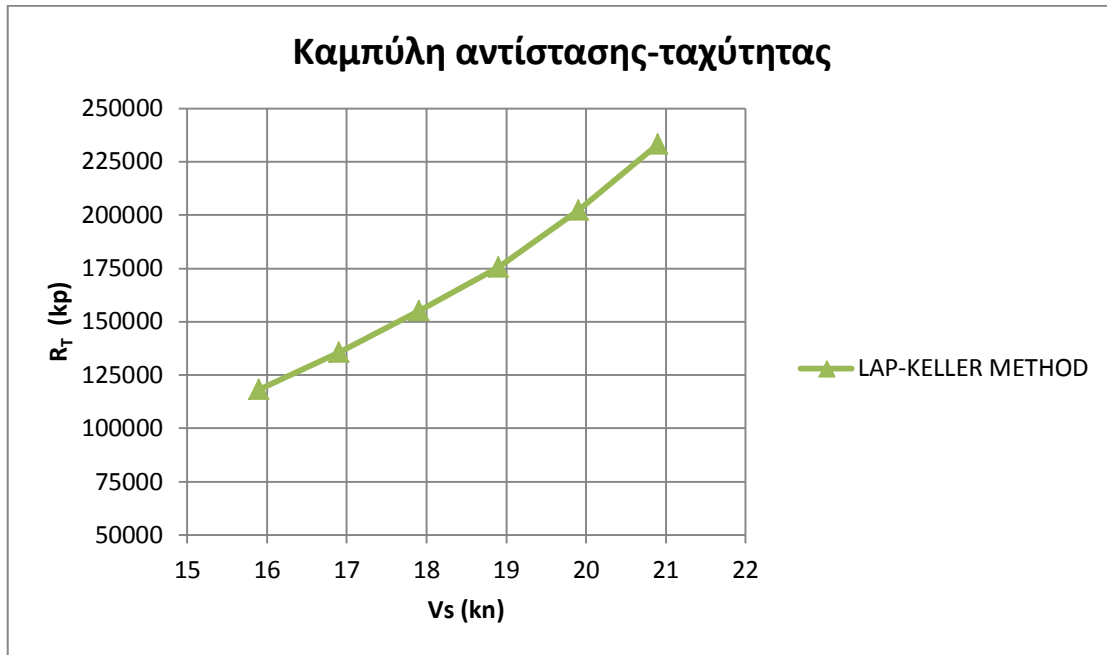
$$R_T = 202305kp \text{ \& } EHP = 27612PS$$

Στον πίνακα 4.10 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλο το εύρος των ταχυτήτων που μελετήθηκαν.

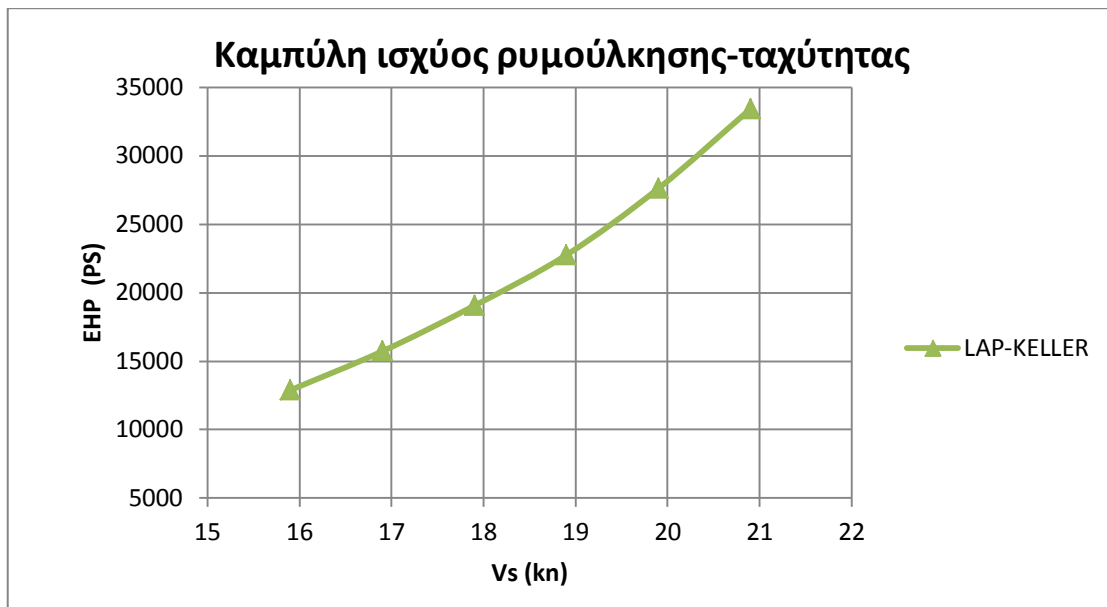
$V_s$ [kn]	$(10^3 C_T)$	$R_T$ [kp]	EHP [PS]	$F_n$
15.9	3.115	118111	12880	0.155
16.9	3.166	135652	15724	0.165
17.9	3.229	155198	19054	0.175
18.9	3.276	175528	22754	0.184
<b>19.9</b>	<b>3.406</b>	<b>202305</b>	<b>27612</b>	<b>0.194</b>
20.9	3.558	233104	33415	0.204

Πίνακας 4.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέθοδο αντίστασης Lap-Keller

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν με μορφή διαγραμμάτων τα αποτελέσματα του πίνακα 4.9.



Διάγραμμα 4.5: Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (LAP/KELLER)



Διάγραμμα 4.6: Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (LAP/KELLER)

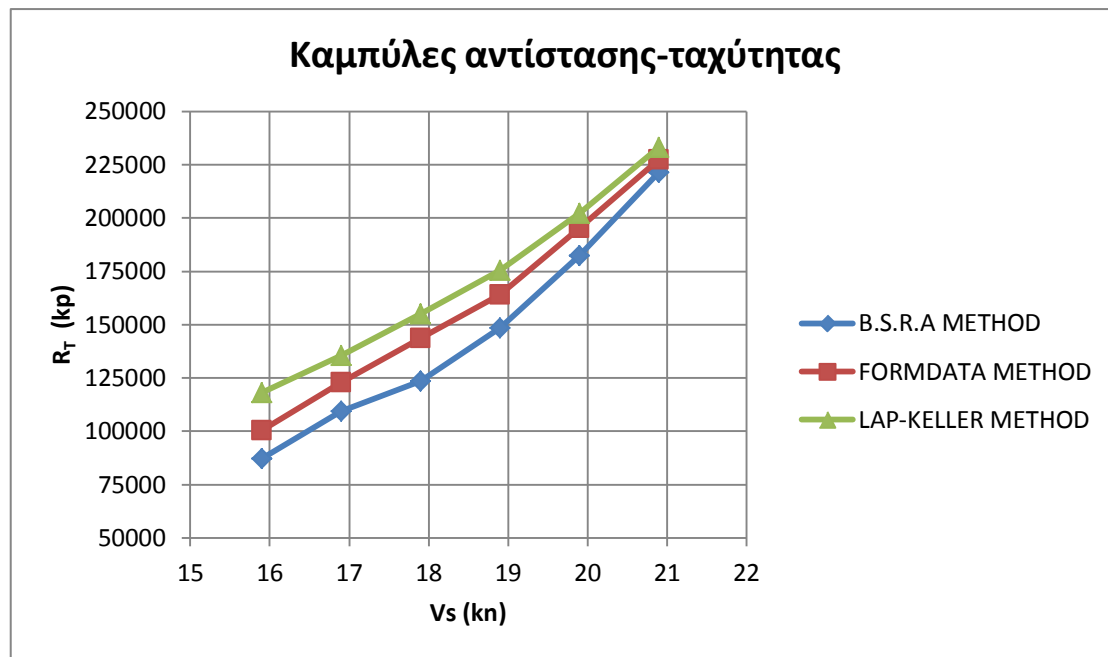
#### 4.2.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εφαρμογής σειρών αντίστασης-Σύγκριση με μέθοδο Holtrop & Mennen

Στον πίνακα 4.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ολικής αντίστασης  $R_T$  καθώς και της ισχύος ρυμούλκησης EHP στο εύρος ταχυτήτων που μελετήθηκαν.

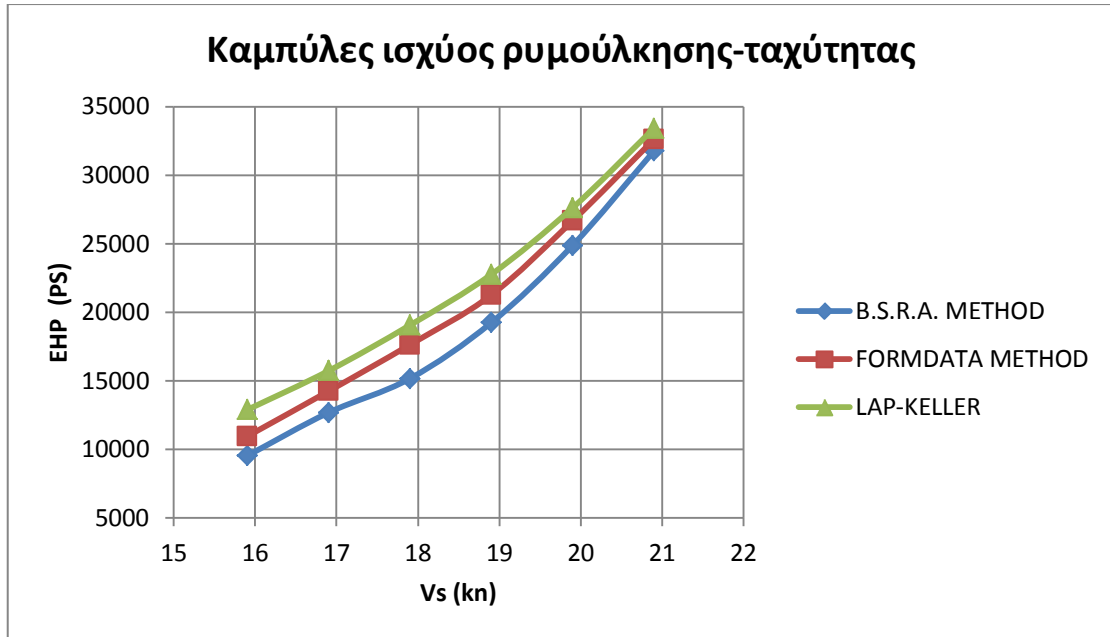
$V_s$ [kn]	$R_{TOTAL}$ [kp]			EHP[PS]		
	B.S.R.A	FORMDATA	LAP-KELLER	B.S.R.A	FORMDATA	LAP-KELLER
15.9	87379	100348	118111	9529	10943	12880
16.9	109383	122847	135652	12679	14239	15724
17.9	123483	143581	155198	15160	17627	19054
18.9	148394	163951	175528	19236	21253	22754
<b>19.9</b>	<b>182225</b>	<b>195361</b>	<b>202305</b>	<b>24871</b>	<b>26664</b>	<b>27612</b>
20.9	221511	227482	233104	31753	32609	33415

Πίνακας 4.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειρών αντίστασης

Τέλος, στα διαγράμματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της αντίστασης και της ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας για καθεμία από τις μεθόδους.



Διάγραμμα 4.7: Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου για τις μεθόδους B.S.R.A-FORMDATA-LAP/KELLER



**Διάγραμμα 4.8:** Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου για τις μεθόδους B.S.R.A.-FORMDATA-LAP/KELLER

Παρατηρείται ότι οι μέθοδοι συγκλίνουν όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Όσον αφορά σε χαμηλές ταχύτητες, η μέθοδος B.S.R.A. παρουσιάζει σημαντική απόκλιση σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους, οπότε τα αποτελέσματά της είναι υπό αμφισβήτηση. Επιλέγεται για μεγαλύτερη ακρίβεια να απορριφτεί η μέθοδος B.S.R.A και να ληφθεί υπόψιν ο μέσος όρος των άλλων δύο μεθόδων. Επομένως για το υπό μελέτη πλοίο η αντίσταση και η ισχύς ρυμούλκησης του παρουσιάζεται στον πίνακα 4.12:

	<b>R<sub>TOTAL</sub> [kp]</b>	<b>EHP[PS]</b>
15.9	109229	11912
16.9	129249	14981
17.9	149389	18341
18.9	169740	22003
<b>19.9</b>	<b>198833</b>	<b>27138</b>
20.9	230293	33012

**Πίνακας 4.12:** Τελικά αποτελέσματα για το υπό μελέτη πλοίο για τις πειραματικές μεθόδους

Σε αυτό το στάδιο της μελέτης γίνεται υπολογισμός της αντίστασης του υπό μελέτη πλοίου με τη χρήση της μεθόδου Holtrop & Mennen. Εξελίχθηκε με βάση τη σταδιακή ανάλυση όλων των διαθέσιμων δεδομένων από πειράματα προτύπων αλλά και αποτελεσμάτων σε πραγματική κλίμακα που διέθετε έως το 1989 η Πειραματική Δεξαμενή της Ολλανδίας (Netherlands Ship Model Basin). Η μέθοδος εφαρμόστηκε με επιτυχία σε πολεμικά πλοία στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος για λογαριασμό του Ολλανδικού Ναυτικού.

Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιεί πίνακες, αλλά αντίθετα είναι γραμμένη σε γλώσσα FORTRAN ή MATLAB. Για το λόγο αυτό συγκρίνονται τα αποτελέσματα με αυτά που έχουν προκύψει από τις πειραματικές μεθόδους. Στον πίνακα 4.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων. Εκ των προτέρων είναι γνωστό ότι η σειρά αυτή οδηγεί σε

υπερεκτίμηση της συνολικής αντίστασης και της ισχύος ρυμούλκησης. Παρατηρείται ότι η απόκλιση είναι πολύ μικρή, <5% για την υπηρεσιακή ταχύτητα ενώ το ποσοστό αυτό μειώνεται με αύξηση της ταχύτητας.

V <sub>s</sub>	R <sub>TOTAL</sub> [kp]		
	Πειραματικές μέθοδοι	Holtrop & Mennen	Απόκλιση %
15.9	109229	120510	10.3
16.9	129249	138210	6.9
17.9	149389	158410	6.0
18.9	169740	181610	7.0
<b>19.9</b>	<b>198833</b>	<b>208340</b>	<b>4.8</b>
20.9	230293	239230	3.9

Πίνακας 4.13: Σύγκριση πειραματικών μεθόδων με μέθοδο Holtrop & Mennen

### 4.3 Υπολογισμός συντελεστών μείωσης ώσης και ομόρρου

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η αντίσταση του πλοίου R με την έλικα σε λειτουργία είναι διαφορετική από την αντίσταση ‘ρυμούλκησης’ του πλοίου R<sub>0</sub> στην ίδια ταχύτητα και εξοπλισμένου με τα παρελκόμενα του αυτοπροωθούμενου πλοίου πλην της έλικας (π.χ. πηδάλιο-άξονες-στηρίγματα αξόνων). Η διαφορά αυτή δεν είναι αμελητέα. Ο λόγος είναι ο ακόλουθος: και στις δύο περιπτώσεις η αντίσταση του πλοίου είναι το ολοκλήρωμα των καθέτων και εφαπτομενικών δυνάμεων που ασκεί το ρευστό στη γάστρα. Οι δυνάμεις, όμως είναι διαφορετικές στις δύο περιπτώσεις στην περιοχή της πρύμνης. Ειδικότερα, η λειτουργία της έλικας στην περιοχή της πρύμνης μειώνει τις πιέσεις (κάθεται τάσεις) και τροποποιεί τις εφαπτομενικές τάσεις (διαφορετικό οριακό στρώμα) με συνέπεια:

$$R > R_0$$

Ο λόγος R<sub>0</sub>/R ορίζεται ως το ‘ποσοστό μείωσης της ώσης t’

Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπ’ όψιν ότι η έλικα δεν λειτουργεί σε παράλληλη ροή ταχύτητας V αλλά στα ‘απόνερα’ ή στον ‘ομόρρο’ (δηλαδή στο οριακό στρώμα) του πλοίου. Το οριακό στρώμα του πλοίου εμποδίζει τη ροή προς την έλικα με αποτέλεσμα η έλικα (του αυτοπροωθούμενου πλοίου) να βλέπει ανομοιόμορφο πεδίο ταχύτητας ρευστού και κατά τις τρεις διευθύνσεις (αξονική-γωνιακή-ακτινική στο σύστημα κυλινδρικών συντεταγμένων). Χωρίς κάποιο σημαντικό σφάλμα, μπορεί να θεωρηθεί ότι η έλικα του αυτοπροωθούμενου πλοίου ‘βλέπει’ μία μέση αξονική ταχύτητα V<sub>0</sub>, διαφορετική από την ταχύτητα του πλοίου V. Δεδομένου ότι το πλοίο εμποδίζει τη ροή προς την έλικα θα ισχύει:

$$V_0 < V$$

Ο λόγος V<sub>0</sub>/V ορίζεται ως το ‘ποσοστό ομόρρου w’

- Υπολογισμός συντελεστή ομόρρου w

Ο υπολογισμός του συντελεστή ομόρρου θα γίνει με χρήση τριών μεθόδων:

Kruger

$$w = 0.75 \times C_B - 0.24 = 0.336$$

Hecksher

$$w = 0.7 \times C_P - 0.18 = 0.428$$

Troost

$$w = 0.25 + 2.5 \times (C_B - 0.6)^2 = 0.321$$

Από τον μέσο όρο των παραπάνω μεθόδων προκύπτει ότι : **w = 0.362**

- Υπολογισμός συντελεστή μείωσης ώσης t

Ομοίως, ο υπολογισμός του συντελεστή μείωσης ώσης θα γίνει με χρήση τριών μεθόδων:

SSPA

$$t = w \times \left( 1.57 - C_B \cdot \frac{2.3 - 1.5 \times C_{WL}}{C_{WL}} \right) = 0.159$$

Hecksher

$$t = 0.5 \times C_P - 0.18 = 0.254$$

Danckwardt

$$t = 0.5 \times C_B - 0.15 = 0.234$$

Από τον μέσο όρο των παραπάνω μεθόδων προκύπτει ότι : **t = 0.215**

#### 4.4 Υπολογισμός ισχύος πρόωσης, συνεργασία πλοίου-έλικας

Πλέον, έχοντας υπολογίσει την ολική αντίσταση του πλοίου και τους συντελεστές ομόρρου και μείωσης της ώσης, μένει η επιλογή της έλικας. Η έλικα που θα χρησιμοποιηθεί ανήκει στη σειρά Wagenigen-B. Συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά της είναι:

**Τύπος: Wagenigen-B**

**Αριθμός πτερύγων: 5**

**Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας:  $A_e/A_0=0.66$**

**Διάμετρος έλικας : 8.6m**

Η επιλογή της έλικας δεν είναι τυχαία. Αντιστοιχεί στην έλικα που διαθέτουν τόσο το κινούμενο με ηλεκτροπρόωση πλοίο όσο και αυτό με ατμό. Με βάση τα δεδομένα αυτά και, αφού πρώτα υπολογιστεί ο συντελεστής σχετικής περιστροφής  $\eta_r$ , θα χρησιμοποιηθεί μια υπορουτίνα(**grid**), γραμμένη σε γλώσσα FORTRAN-95 για τον υπολογισμό της απαιτούμενης αποδιδόμενης ισχύος ώστε το πλοίο να μπορεί να κινηθεί στην υπηρεσιακή του ταχύτητα.

- Υπολογισμός συντελεστή σχετικής περιστροφής  $\eta_R$

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908 \cdot \frac{A_e}{A_0} + 0.07424 \cdot (C_P - 0.0225 \cdot \left(-\frac{L_{PP}}{2 + LCB}\right))$$

Οπότε:

$$\eta_R=1.0137$$

Στο πρόγραμμα εισάγονται τα παρακάτω δεδομένα. Αρχικά εκτελείται το πρόγραμμα για να βρεθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Στη συνέχεια θα εκτελεστεί ξανά το πρόγραμμα στο βέλτιστο σημείο για όλες τις τιμές των ταχυτήτων που έχουν μελετηθεί.

8.6 0.66 5 (diameter, expanded area ratio, number of blades)

.99 (shaft efficiency)

1 (number of propellers)

104.61 (fluid density in  $kp\ s^2/m^4$ )

10 1 (number of P/D points, number of resistance points)

.5 (P/D grid points)

.6

.7

.8

.9

1.

1.1

1.2

1.3

1.4

10.24 198833 0.362 0.215 1.0137 0. ( $V_s, R, w, t, nr, F$  (added force))

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 4.14:

V <sub>s</sub> (kn)=19.9, number of propellers=1						
SPEED [rpm]	P/D	T [kp]	Q [kpm]	DHP[PS]	SHP[PS]	P.C.
124.4	0.5	214012.5	223938.5	39085.8	39883.5	0.563
108.3	0.6	214012.5	229031.1	34644.6	35351.7	0.636
96.5	0.7	214012.5	241113.6	32497.9	33161.1	0.678
87.5	0.8	214012.5	257448.5	31466.0	32108.2	0.700
80.5	0.9	214012.5	276397.4	31057.3	31691.1	0.709
<b>74.8</b>	<b>1.0</b>	<b>214012.5</b>	<b>297163.7</b>	<b>31037.2</b>	<b>31670.6</b>	<b>0.709</b>
70.2	1.1	214012.5	319283.2	31277.4	31915.7	0.704
66.3	1.2	214012.5	342391.5	31694.6	32341.4	0.695
63.0	1.3	214012.5	366097.4	32223.7	32881.3	0.683
60.3	1.4	214012.5	389903.7	32803.4	33472.9	0.671

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα προγράμματος grid για την ταχύτητα υπηρεσίας

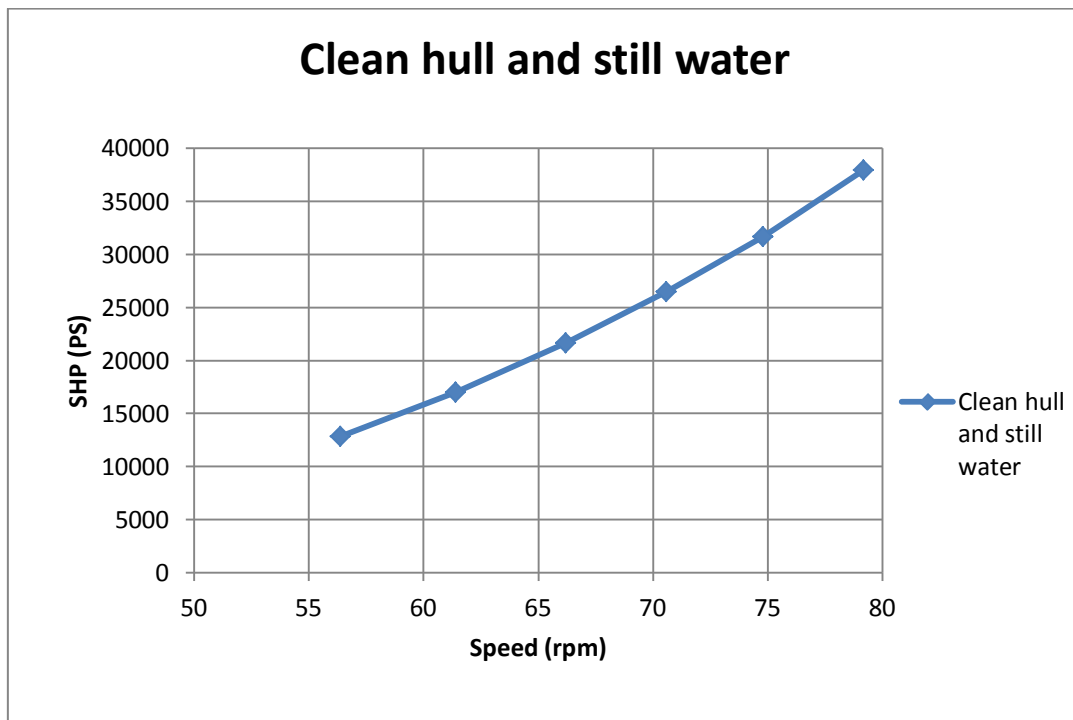


Από τον πίνακα 4.14 παρατηρείται ότι ο μέγιστος συντελεστής πρόωσης αντιστοιχεί σε τιμή  $P.C.=0.709$ . Το σημείο αυτό με  $P/D=1.0$  θα αποτελεί το σημείο λειτουργίας. Στη συνέχεια εκτελείται το πρόγραμμα grid για όλο το εύρος ταχυτήτων, στο ίδιο σημείο λειτουργίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4.15:

Clean hull and still water						
P/D=1.0, number of propellers=1						
SPEED [rpm]	V (kn)	T [kp]	Q [kpm]	DHP[PS]	SHP[PS]	P.C.
56.4	15.9	113922.2	160405.0	12627.2	12884.9	0.738
61.4	16.9	139170.5	194745.4	16702.4	17043.3	0.726
66.2	17.9	164826.6	229668.4	21224.7	21657.9	0.717
70.6	18.9	189477.5	263453.2	25973.7	26503.8	0.712
<b>74.8</b>	<b>19.9</b>	<b>214012.6</b>	<b>297163.7</b>	<b>31037.2</b>	<b>31670.6</b>	<b>0.709</b>
79.2	20.9	242411.3	335937.9	37170.8	37929.4	0.705

Πίνακας 4.15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προγράμματος grid.

Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, απαιτούνται 31670PS για να επιτευχθεί η υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου. Πράγματι, σύμφωνα με το σχέδιο γενικής διάταξης του πλοίου, η απαιτούμενη ισχύς είναι 31681PS, δηλαδή το σφάλμα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε αντιστοιχεί σε 0.03%. Στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζεται η καμπύλη στροφών της έλικας-απαιτούμενης ισχύος SHP.



Διάγραμμα 4.9: SHP-rpm για καθαρή γάστρα και ήρεμο νερό

Τέλος, ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αυτό θα παραχθεί η εξίσωση που θα συνδέει την ισχύ πρόωσης με την ταχύτητα του πλοίου. Χρησιμοποιείται πολυώνυμο 5<sup>ου</sup> βαθμού το οποίο θα πρέπει να ικανοποιεί τις σχέσεις :

$$f(P)=V_s, \text{ με } V_s \text{ σε [kn] \& P[kW]} \quad (4.1)$$

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ & ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

Τα ζεύγη P(ισχύς στον άξονα)- $V_s$  φαίνονται στον πίνακα 4.16 ενώ το πολυώνυμο που ικανοποιεί την σχέση (4.1) είναι :

$$V_s = (1.814 \cdot 10^{-20})P^5 - (1.528 \cdot 10^{-15})P^4 + (5 \cdot 10^{-11})P^3 - (8 \cdot 10^{-7})P^2 + 0.0066 \cdot P - 6.875 \quad (4.2)$$

P [kW]	$V_s$ [kn]
9470	15.9
12527	16.9
15919	17.9
19480	18.9
23278	19.9
27878	20.9

**Πίνακας 4.16:** Απαίτηση ισχύος για την αντίστοιχη ταχύτητα

Η εξίσωση (4.2) αποτελεί το λόγο που πραγματοποιήθηκε η μελέτη της αντίστασης σε αυτό το κεφάλαιο. Με τον τρόπο αυτό, γνωρίζοντας δηλαδή την ισχύ του άξονα, μπορεί να προσεγγισθεί με αρκετή ακρίβεια η ταχύτητα του πλοίου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ ΣΕ LNG CARRIER**

### **5.1 Γενικά στοιχεία**

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται λόγος για την ηλεκτροπρόωση. Θα μελετηθούν οι δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI-EEOI), η κατανάλωση καυσίμου (BOG-H.F.O.) και λιπαντικών, το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης και τα βάρη των καλωδιώσεων. Τέλος, θα παρατεθούν ορισμένα οικονομικά στοιχεία που αφορούν το κόστος λειτουργίας και ανέγερσης του πλοίου

Αρχικά, ο δείκτης EEDI θα υπολογιστεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος θα είναι αυτός που έχει αναφερθεί στην ενότητα 1.4.2 και θα συγκριθεί με τις υπάρχουσες γραμμές αναφοράς. Τονίζεται ότι γραμμές αναφοράς για LNG carriers με ηλεκτροπρόωση δεν υπάρχουν ακόμα, οπότε η σύγκριση γίνεται με αυτές των συμβατικών πλοίων. Ο δεύτερος αποτελεί πρόταση του CMTI (Centrum Maritieme Technologie en Innovatie). Στη συνέχεια, προσεγγίζεται ο δείκτης αυτός, από διαφορετική οπτική γωνία. Το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος, η ειδική κατανάλωση και η ταχύτητα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του EEDI θα λάβουν διαφορετικές τιμές από αυτές που συνιστά ο IMO .Επίσης υπολογίζεται και ο δείκτης EEOI σε καταστάσεις πλεύσης με H.F.O και BOG.

Στη συνέχεια θα εξεταστεί η κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών σε κατάσταση πλεύσης, φόρτωσης και εκφόρτωσης. Οι ηλεκτρομηχανές μπορούν να καταναλώσουν, είτε H.F.O. (Heavy Fuel Oil) είτε BOG (Boil Off Gas) οπότε θα μελετηθούν δύο ξεχωριστές καταστάσεις. Η μελέτη της διάταξης του μηχανοστασίου, με επίκεντρο το βάρος των κυριότερων μηχανημάτων που επιδρούν στην πρόωση του πλοίου, αποτελεί το επόμενο θέμα της διπλωματικής. Οι καλωδιώσεις αποτελούν σημαντικό παράγοντα όσον αφορά τα πλοία με ηλεκτροπρόωση και για το λόγο αυτό πρέπει να εξεταστεί η συμμετοχή του βάρους τους.

Τέλος, θα πραγματοποιηθεί μία οικονομική μελέτη. Λαμβάνονται υπ' όψιν οι τρέχουσες τιμές των καυσίμων-λιπαντικών για να μελετηθεί το κόστος λειτουργίας και εκτιμάται και το κόστος ανέγερσης του πλοίου. Το κεφάλαιο κλείνει με τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου.

### **5.2 Υπολογισμός δείκτη EEDI**

Αν και δεν έχουν ολοκληρωθεί οι μελέτες για την οριστικοποίηση του δείκτη EEDI σε πλοία με ηλεκτροπρόωση, θα χρησιμοποιηθεί ο προτεινόμενος για μη συμβατική πρόωση, ο οποίος προκύπτει από τον αρχικό με ορισμένες απλοποιήσεις:

$$Estimated\ Index\ Value = \frac{(C_{F,ME} \cdot SFC_{ME} \cdot \sum_{i=1}^n P_{ME(i)} + C_{F,AE} \cdot SFC_{AE} \cdot (P_{AE} + \sum_{i=1}^n P_{PTI(i)}))}{Capacity \cdot V_{ref}} \quad (5.1)$$

Οι μονάδες μέτρησης του παραπάνω δείκτη είναι :  $\frac{grCO_2}{hour}$  /  $tons \cdot knots$

### 5.2.1 Υπολογισμός δείκτη EEDI, Ά τρόπος

Το υπό μελέτη πλοίο διαθέτει 4 ηλεκτρογεννήτριες 9L50DF (WARTSILA) των 8775kW η καθεμία και μια βοηθητική γεννήτρια (έκτατης ανάγκης) 850kW (STX Engine). Οι 2 κινητήρες πρόωσης έχουν συνολική ισχύ 26520kW (CONVERTEAM).

Για την σχέση (5.1) ισχύει :

✓  $P_{ME(i)}=0$  , αφού δεν υπάρχει εγκατεστημένη κύρια μηχανή.

✓  $P_{PTI(i)} = 0.75 \cdot \frac{P_{SM \cdot MAX}}{\eta_{gen}}$

Στο project guide των γεννητριών, αναγράφεται ότι ο συντελεστής απόδοσης είναι 96.5% στο 75% του φορτίου τους.

Οπότε για το υπό μελέτη πλοίο:

$$P_{PTI(i)} = 20611.4 \text{ kW}$$

✓ Οι κανονισμοί προτείνουν τις σχέσεις (5.2) & (5.3) για τον προσδιορισμό της ισχύος  $P_{AE}$ . Οι σχέσεις αυτές είναι:

$$P_{AE} = 0.025 \cdot \left( MCR_{ME} + \frac{P_{PTI(i)}}{0.75} \right) + 250, \text{ MCR}_{ME} + P_{PTI} > 10000 \text{ kW} \quad (5.2)$$

$$P_{AE} = 0.05 \cdot \left( MCR_{ME} + \frac{P_{PTI(i)}}{0.75} \right), \text{ MCR}_{ME} + P_{PTI} < 10000 \text{ kW} \quad (5.3)$$

Οπότε για το υπό μελέτη πλοίο χρησιμοποιώντας τον τύπο (5.2) προκύπτει:

$$P_{AE} = 937.06 \text{ kW}$$

✓ Όσον αφορά τη χωρητικότητα (Capacity), λαμβάνεται deadweight (DWT)=90327.7t από τον πίνακα 4.1 ενώ ως ταχύτητα αναφοράς θα ληφθεί η υπηρεσιακή ταχύτητα  $V_S=19.9 \text{ kn}$

✓ Ο συντελεστής  $C_{F,AE}$  εξαρτάται από το καταναλισκόμενο καύσιμο (H.F.O / LNG). Το ίδιο συμβαίνει και με την ειδική κατανάλωση. Η ειδική κατανάλωση SFC λαμβάνεται υπόψιν στο 75% της ονομαστικής ισχύος των ηλεκτρογεννητριών. Για το καύσιμο LNG θεωρείται θερμογόνος δύναμη 48000kJ/kg.

	WARTSILA 9L50DF		
	100% Load	75% Load	50% Load
Fuel oil specific consumption [g/kWh]	189	192	204
Fuel gas specific consumption [kJ/kWh]	7258	7562	8153

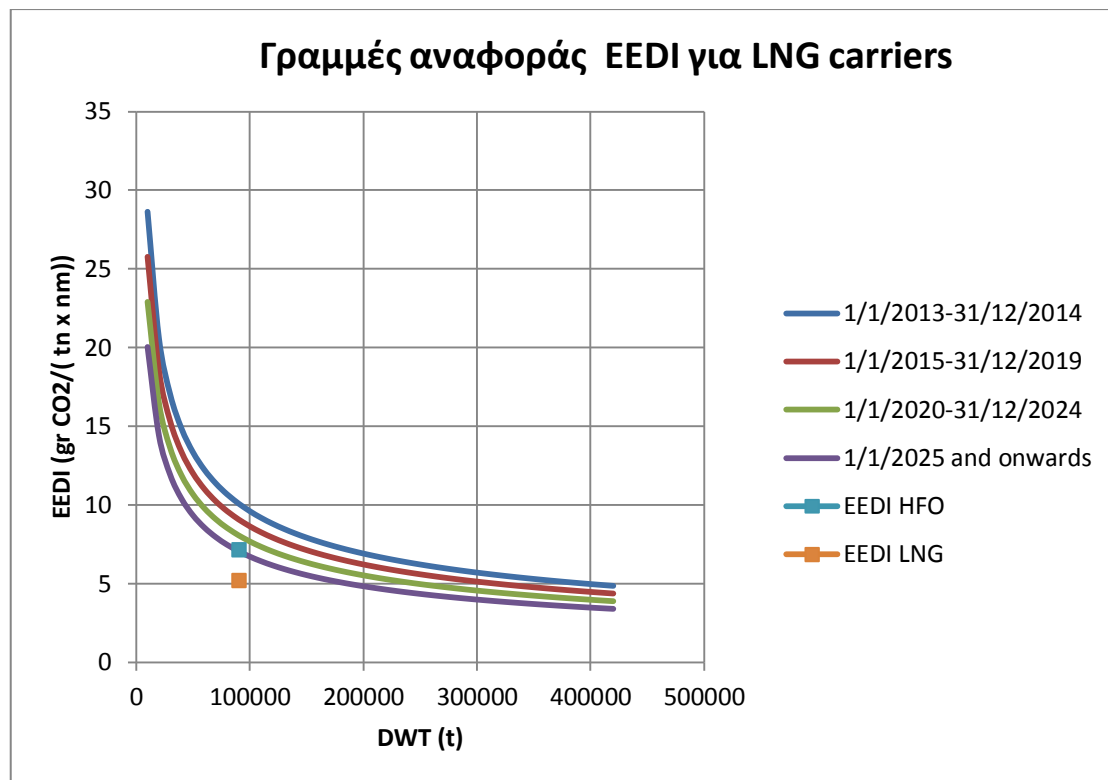
**Πίνακας 5.1:** Ειδική κατανάλωση καυσίμου για την γεννήτρια WARTSILA 9L50DF

Συνεπώς προκύπτει ο πίνακας 5.2 στον οποίο φαίνεται ο ενεργειακός δείκτης EEDI τόσο για κατανάλωση HFO, όσο και φυσικού αερίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την καύση BOG χρησιμοποιείται και ένα μικρό ποσοστό καυσίμου diesel oil που στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής έχει αμεληθεί. Το ποσοστό του καυσίμου ανέρχεται περίπου στο 7%.

Ship type	Diesel electric LNG-carrier	
DWT (t)	90327.7	
V <sub>S</sub> (kn)	19.9kn	
P <sub>PT(i)</sub> (kW)	20611.4	
P <sub>AE</sub> (kW)	937.05	
Fuel type	HFO	LNG
C <sub>F</sub> (gr CO <sub>2</sub> /gr fuel)	3.1144	2.75
SFC (gr/kWh)	192	157.54
EEDI (gr CO <sub>2</sub> /(tn x nm))	<b>7.17</b>	<b>5.19</b>

Πίνακας 5.2: Τιμή EEDI υπό μελέτη πλοίου κατά IMO

Όπως ήταν αναμενόμενο η τιμή του δείκτη EEDI είναι αισθητά μικρότερη σε συνθήκες κατανάλωσης Boil off Gas. Στο διάγραμμα 5.1 συγκρίνονται οι τιμές αυτές με τις υπάρχουσες γραμμές αναφοράς. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται και οι γραμμές αναφοράς για τα επόμενα χρόνια. Οι τιμές τους προκύπτουν μειώνοντας τις τιμές των EEDI Reference Lines (2013-2014) κατά 10% για κάθε επόμενη δεκαετία ( GL guidelines).



Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση πλοίου με ηλεκτροπρόωση με τα όρια αναφοράς (IMO)

Το υπό μελέτη πλοίο παραδόθηκε τον Ιούλιο του 2013. Θεωρώντας ως χρόνο ζωής-λειτουργίας τα 25 χρόνια είναι κατανοητό το γιατί πρέπει να συγκριθούν οι τιμές του EEDI με αυτές που θα υπάρχουν στα επόμενα χρόνια. Όσον αφορά την χρήση φυσικού αερίου, η τιμή αυτή είναι αισθητά μικρότερη από τις απαιτούμενες. Η κατανάλωση Η.Φ.Ο. οριακά δεν ικανοποιεί την καμπύλη του 2025. Μία μικρή αύξηση της ταχύτητας θα διόρθωνε το

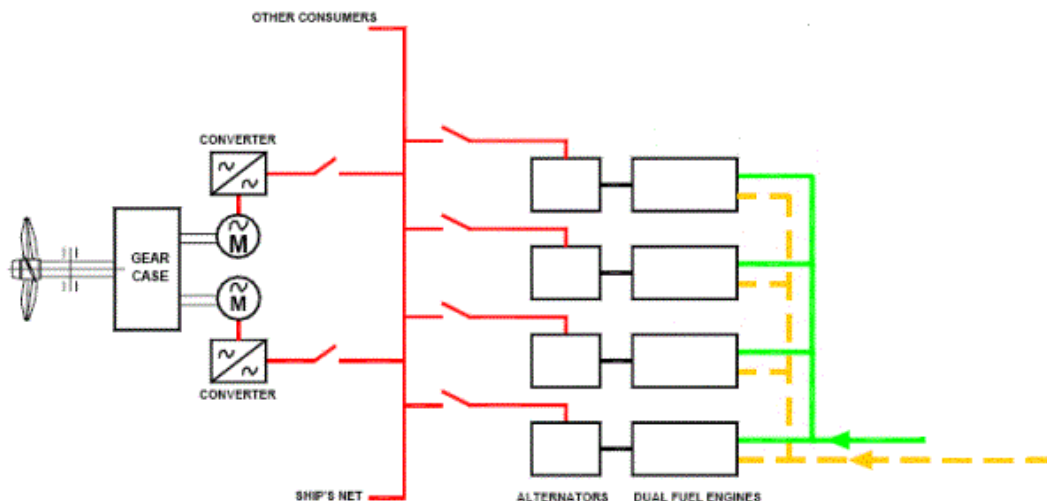
πρόβλημα αυτό. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι κανονισμοί του EEDI δεν έχουν τεθεί ακόμα σε εφαρμογή για τα LNG carriers.

### 5.2.2 Υπολογισμός δείκτη EEDI, Β τρόπος

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, σε ότι αφορά την ηλεκτροπρόωση η προτεινόμενη μεθοδολογία του IMO δεν είναι τόσο αξιόπιστη. Ο τύπος υπολογισμού βασίζεται στην εγκατεστημένη ισχύ πρόωσης, η οποία δεν μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα για ένα πλοίο ηλεκτροπρόωσης. Οι γεννήτριες έχουν σχεδιαστεί ώστε να παρέχουν ισχύ σε μία σειρά εφαρμογών με ποικίλες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, συμπεριλαμβανομένου των κινητήρων πρόωσης.

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

Στο υπό μελέτη πλοίο, η διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης φαίνεται στο σχήμα 5.1



**Σχήμα 5.1:** Τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης. Με πράσινο χρώμα συμβολίζεται το BOG, ενώ με κίτρινο το HFO. Στο σχήμα δεν παρουσιάζονται οι μετασχηματιστές.

Ο δεύτερος τρόπος, σε αντίθεση με τον πρώτο επικεντρώνεται στην εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ. Στον Α τρόπο κυρίαρχο ρόλο αποτέλεσαν οι ηλεκτροκινητήρες, ενώ εδώ οι ηλεκτρογεννήτριες αποτελούν τη βάση των υπολογισμών. Ο τύπος που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

$$Estimated\ EEDI = \frac{P_{ME} \cdot C_F \cdot SFC + P_{AE} \cdot C_F \cdot SFC}{Capacity \cdot V_{ref}}$$

όπου :

✓  $P_{ME} = f_{elec} \cdot P_{elec}$ .

Ο όρος  $P_{elec}$  αντιστοιχεί στο 75% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτρογεννητριών. Ο όρος  $f_{elec}$  αντιστοιχεί στις απώλειες ισχύος από την

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΩΣΗΣ ΣΕ LNG CARRIER

ηλεκτρογεννήτρια μέχρι τον ηλεκτροκινητήρα. Στη βιβλιογραφία οι τιμές που λαμβάνει είναι 1.1-1.2. Επιλέγεται η τιμή  $f_{elec}=1.15$

Για υπό μελέτη πλοίο:

$$P_{ME} = 30273.75kW$$

✓  $P_{AE} = (0.025 \times MCR_{ME}) + 250$

Ο όρος  $MCR_{ME}$  ορίζεται ως το 75% του  $P_{ME}$ .

Για το υπό μελέτη πλοίο:

$$P_{AE} = 1259.12kW$$

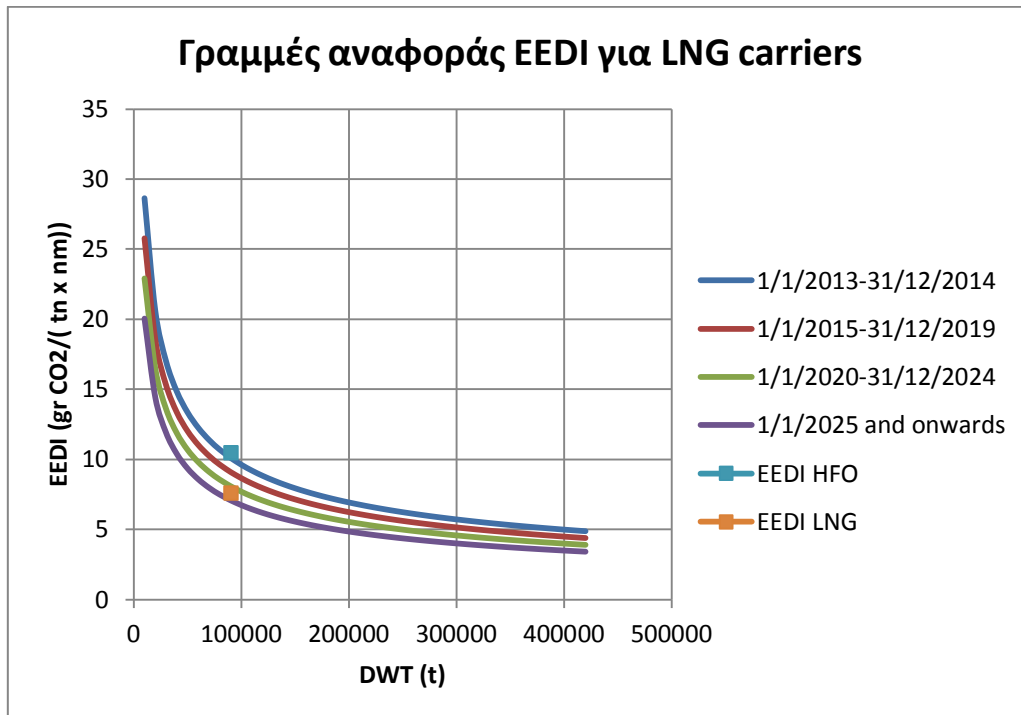
✓ Οι ποσότητες Capacity,  $C_F$ , SFC,  $V_S$  ορίζονται όπως και στον 'Α τρόπο.

Συνεπώς προκύπτει ο πίνακας 5.3 στον οποίο φαίνεται η τιμή του ενεργειακού δείκτη EEDI για L.N.G. και H.F.O.

Ship type	Diesel electric LNG-carrier	
DWT (t)	90327.7	
$V_S$ (kn)	19.9kn	
$P_{ME}$ (kW)	30273.75	
$P_{AE}$ (kW)	1259.12	
Fuel type	HFO	LNG
$C_F$ (gr CO <sub>2</sub> /gr fuel)	3.1144	2.75
SFC (gr/kWh)	192	157.54
EEDI (gr CO <sub>2</sub> /tn x nm)	<b>10.49</b>	<b>7.60</b>

Πίνακας 5.3: Τιμή EEDI υπό μελέτη πλοίου κατά CTMI

Στο διάγραμμα 5.2, όπως και προηγουμένως συγκρίνονται οι τιμές αυτές με τις υπάρχουσες γραμμές αναφοράς.



Διάγραμμα 5.2: Σύγκριση πλοίου με ηλεκτροπρόωση ως προς τα όρια αναφοράς (CTMI)

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το διάγραμμα 5.2 η τιμή του EEDI για κατανάλωση HFO, ξεπερνά τα απαιτούμενα όρια, ενώ η αντίστοιχη τιμή για χρήση LNG δεν υπερβαίνει τις απαιτήσεις της χρονιάς 2024. Γενικά, παρατηρείται μία υπερεκτίμηση των δεικτών με αυτή τη μέθοδο. Το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο αφού η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από την ισχύ πρόωσης που χρησιμοποιεί ο τύπος του IMO ως βάση του υπολογισμού.

Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων για τον δείκτη EEDI και τα όρια που προκύπτουν από τους κανονισμούς του IMO.

	HFO		LNG
<b>EEDI<sub>IMO</sub></b>	7.17		5.19
<b>EEDI<sub>CTMI</sub></b>	10.49		7.60
<b>Όρια αναφοράς EEDI</b>			
1/1/2013-31/12/2014	1/1/2015-31/12/2019	1/1/2020-31/12/2024	1/1/2025- και έπειτα
<b>10.84</b>	<b>9.08</b>	<b>8.08</b>	<b>7.06</b>

Πίνακας 5.4: Τιμές EEDI και όρια αναφοράς

### 5.2.3 Παραμετροποίηση δείκτη EEDI κατά IMO

Στην παράγραφο αυτή θα εξετασθεί πως μεταβάλλεται ο ενεργειακός δείκτης EEDI αν μεταβληθεί το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος που λαμβάνεται υπόψιν. Σύμφωνα με τον IMO το ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος είναι το 75% της ονομαστικής ισχύος των ηλεκτροκινητήρων. Συνεπώς και η ειδική κατανάλωση λαμβάνεται στο 75% του σημείου λειτουργίας των γεννητριών. Βασική υπόθεση της παραγράφου αυτής είναι: Αν μεταβληθεί το ποσοστό αυτό (δηλαδή το 75%) θα μεταβληθεί ο όρος  $P_{PTI}$  ισχύς που αφορά τα 'βοηθητικά' μηχανήματα ( $P_{AE}$ ) και συνεπώς και η ειδική κατανάλωση που εξαρτάται από το ποσοστό φόρτισης των γεννητριών. Τέλος, η ταχύτητα σε αυτήν την περίπτωση δεν θα είναι η υπηρεσιακή, αλλά αυτή που προκύπτει από την ισχύ που αποδίδουν οι κινητήρες ανάλογα με το ποσοστό που φορτίζονται κάθε φορά. Το ποσοστό φόρτισης των κινητήρων εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας των γεννητριών.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η σχέση (5.1) μετά τις απλοποιήσεις λαμβάνει την ακόλουθη μορφή για πλοία με ηλεκτροπρόωση (ο όρος που αφορά στην ισχύ της κύριας μηχανής, μηδενίζεται):

$$Estimated\ Index\ Value = \frac{(C_{F,AE} \cdot SF_{CAE} \cdot (P_{AE} + \sum_{i=1}^n P_{PTI(i)}))}{Capacity \cdot V_{ref}}$$

#### $C_{F,AE}$ , Capacity

Οι όροι αυτοί παραμένουν σταθεροί. Ο όρος  $C_{F,AE}$  εξαρτάται από το είδος του καυσίμου ενώ η χωρητικότητα αντιστοιχεί στο νεκρό βάρος του πλοίου. Οι τιμές που λαμβάνουν είναι αυτές του τρόπου A & B.



**SFC<sub>AE</sub>**

Οι τιμές της ειδικής κατανάλωσης που δίνονται από το project guide της WARTSILA παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1. τόσο για καύσιμο HFO όσο και για το BOG. Με τη βοήθεια του προγράμματος *curve editor*, προσεγγίζονται οι ειδικές καταναλώσεις για τα υπόλοιπα σημεία λειτουργίας των γεννητριών. Επομένως :

$$SFC_{HFO} = 72x^2 - 138x + 255, SFC[gr/kWh]$$

$$SFC_{BOG} = \frac{2296x^2 - 5234x + 10196}{48}, SFC[gr/kWh]$$

Η μεταβλητή x αναφέρεται στο σημείο λειτουργίας της γεννήτριας. Προκύπτει από το πηλίκο  $P_{\lambda\epsilon\iota\tau}/P_{on}$  (αδιάστατο μέγεθος).

**P<sub>PTI(i)</sub>**

Ο υπολογισμός EEDI κατά IMO, λαμβάνει υπόψιν του το 75% της εγκατεστημένης ισχύος των κινητήρων όπως αναφέρθηκε. Στην παράγραφο αυτή δεν θα ληφθεί αυτό το σημείο. Αντιθέτως, το σημείο θα μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών. μειωμένο κατά τις απαιτήσεις ισχύος για τις υπόλοιπες λειτουργίες του πλοίου. Σύμφωνα με τον ηλεκτρολογικό ισολογισμό προκύπτει ο πίνακας 5.5:

	Seagoing HFO LADEN	Seagoing GAS LADEN
Απαίτηση ισχύος για τους κινητήρες πρόωσης [kW]	27228	27228
Ενεργειακές απαιτήσεις πλοίου εκτός πρόωσης [kW]	1711.7	2420.1
<b>Συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις [kW]</b>	<b>28939.7</b>	<b>29648.1</b>

**Πίνακας 5.5:** Παρουσιάζονται οι ανάγκες σε ισχύ για την λειτουργία του πλοίου, εκτός από την πρόωση σε κατάσταση εν πλω και με την κατανάλωση του αντίστοιχου καυσίμου. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από λεπτομερή ηλεκτρολογικό ισολογισμό

Τέλος, από το project guide των ηλεκτρογεννητριών προκύπτει ο πίνακας 5.6 που συσχετίζει το σημείο λειτουργίας των γεννητριών με το βαθμό απόδοσής τους.

Load characteristics test	
Load	Generator coefficient
100%	0.968
75%	0.965
50%	0.956
25%	0.923

**Πίνακας 5.6:** Χαρακτηριστικοί βαθμοί απόδοσης των εγκατεστημένων ηλεκτρογεννητριών

Οπότε ο όρος  $P_{PTI(i)}$  θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{PTI(i)} = \frac{\left(\frac{P_{\lambda\epsilon\iota\tau}}{P_{on}} \cdot P_{elec} - P_{cons}\right)}{\eta_{gen}} \cdot \eta_{mot} \quad (5.4)$$

όπου  $P_{elec}$  είναι η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς και  $P_{cons}$  είναι η ισχύς που απαιτούν οι υπόλοιποι καταναλωτές του πλοίου είτε για χρήση HFO είτε BOG(πίνακας 5.4),  $\eta_{gen}$  ο βαθμός απόδοσης των γεννητριών,  $\eta_{mot}$  ο βαθμός απόδοσης των κινητήρων και  $P_{\lambda\epsilon\iota\tau}/P_{on}$  το σημείο λειτουργίας των γεννητριών. Να σημειωθεί ότι υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση του

τύπου (5.4) με τον προτεινόμενο κατά IMO. Η ποσότητα  $\eta_{gen}$  λαμβάνει τιμές από τον πίνακα 5.6. Ο βαθμός απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων λαμβάνεται ίσος με 0.974. Οι ενδιάμεσες τιμές έχουν προσεγγιστεί με τη χρήση του προγράμματος *curve editor*.

### $P_{AE}$

Ο όρος  $P_{AE}$  αποτελεί συνάρτηση του όρου  $P_{PTI}$  σύμφωνα με τον IMO. Επομένως:

$$P_{AE} = 0.025 \cdot \left( \frac{P_{PTI(i)}}{\frac{P_{\lambda EIT}}{P_{on}}} \right) + 250$$

όπου  $\frac{P_{\lambda EIT}}{P_{on}}$  είναι το σημείο λειτουργίας των γεννητριών.

### $Y_S$

Η ταχύτητα του πλοίου εξαρτάται από την ισχύ των κινητήρων πρόωσης. Παραπάνω παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μετάβαση από την ισχύ των ηλεκτρογεννητριών στην ισχύ των κινητήρων. Με τη μεθοδολογία του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου και με την χρήση της εξίσωσης(4.4.1) της ενότητας 4.4 υπολογίζεται η ταχύτητα του πλοίου γνωρίζοντας κάθε φορά την ισχύ που αποδίδουν οι κινητήρες. Η διαφορά στην αποδιδόμενη ισχύ των κινητήρων ,ανάλογα με το καταναλισκόμενο καύσιμο, οφείλεται στις απαιτήσεις των υπόλοιπων καταναλωτών σε ισχύ.

Συνοψίζοντας, προκύπτουν οι πίνακες 5.7 και 5.8. Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζεται στην 1<sup>η</sup> στήλη το σημείο λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών, στη 2<sup>η</sup> , η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς, στην 3<sup>η</sup> και στην 4<sup>η</sup> η μηχανική ισχύς του κινητήρα ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, ενώ τέλος στην 5<sup>η</sup> και στην 6<sup>η</sup> η επιτευχθείσα ταχύτητα του πλοίου.

Άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός ότι από κάποιο σημείο λειτουργίας και άνω η ισχύς των κινητήρων παραμένει σταθερή, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με την ταχύτητα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η αποδιδόμενη ισχύς του κάθε κινητήρα δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 12360kW ( $P_{on,motor}$ ). Συγκεκριμένα, το σημείο λειτουργίας των γεννητριών 0.81-0.82 (ανάλογα το καύσιμο), αντιστοιχεί σε σημείο λειτουργίας των κινητήρων κοντά στη μονάδα.

Στον πίνακα 5.8, η πρώτη στήλη είναι το σημείο λειτουργίας των γεννητριών, η 2<sup>η</sup> και η 3<sup>η</sup> αφορά την ειδική κατανάλωση στο σημείο λειτουργίας των γεννητριών, η 4<sup>η</sup> και η 5<sup>η</sup> στήλη είναι ο όρος που αφορά την εγκατεστημένη ισχύ σύμφωνα με την υπόθεσή μας. Η ποσότητα  $P_{AE}$  περιέχεται στις στήλες 6 και 7. Τέλος, ο ενεργειακός δείκτης EEDI παρουσιάζεται στην 8<sup>η</sup> και στην 9<sup>η</sup> στήλη ανάλογα με το καταναλισκόμενο καύσιμο.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η τιμή του εκτιμώμενου δείκτη EEDI είναι χαρακτηριστικά μικρότερη για κατανάλωση LNG αντί για HFO. Οι τιμές των δεικτών αυξάνονται μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς πρόωσης. Από το σημείο αυτό και μετά φθίνουν παρόλο που η ταχύτητα και η ισχύς των ηλεκτροκινητήρων παραμένει σταθερή. Αιτία του παραπάνω είναι η αύξηση του συντελεστή απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας που επηρεάζει τις ποσότητες  $P_{PTI}$  και  $P_{AE}$ .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΩΣΗΣ ΣΕ LNG CARRIER

Ο πίνακας 5.7 παρουσιάζεται στη συνέχεια. Διευκρινίζεται στο σημείο αυτό ότι η υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου επιτυγχάνεται περίπου στο 70%-75% της ονομαστικής ισχύος των γεννητριών (ανάλογα με το καύσιμο). Οι τιμές που προκύπτουν από την υπόθεση/παραδοχή της ενότητας αυτής δε συμβαδίζουν με τις τιμές του πίνακα 5.4. Ο λόγος της διαφοροποίησης είναι ο εξής: σύμφωνα με τον IMO η ταχύτητα είναι η υπηρεσιακή, ενώ στην συγκεκριμένη περίπτωση εξαρτάται από την αποδιδόμενη ισχύ των κινητήρων.

$P_{\lambda\epsilon\iota\tau}/P_{on}$	$P_{gen}$ [kW]	$P_{propHFO}$ [kW]	$P_{propLNG}$ [kW]	$V_{S,HFO}$ [kn]	$V_{S,LNG}$ [kn]
0.20	7020	5170.3	4480.3	11.9	10.7
0.30	10530	8589.0	7899.0	15.3	14.8
0.40	14040	12007.7	11317.8	16.9	16.4
0.50	17550	15426.5	14736.5	17.8	17.6
0.60	21060	18845.2	18155.3	18.9	18.7
0.70	24570	22263.9	21574.0	19.7	19.5
0.75	26325	23973.4	23283.4	20.0	19.8
0.80	28080	25682.7	24992.7	20.5	20.2
0.82	28782	26366.5	25676.5	20.8	20.5
0.84	29484	26520.0	26360.2	20.9	20.8
0.90	31590	26520.0	26520	20.9	20.9
1.00	35100	26520.0	26520	20.9	20.9

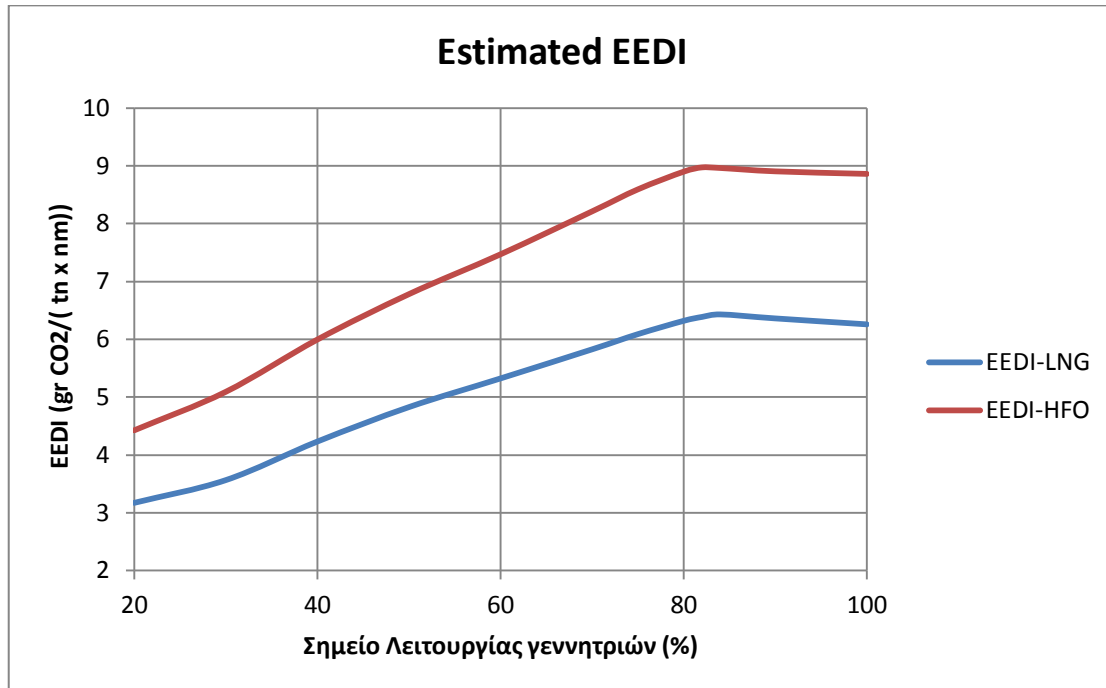
Πίνακας 5.7: Υπολογισμός ταχύτητας πλοίου ανά σημείο λειτουργίας των γεννητριών

Στον πίνακα 5.8 φαίνεται ο τελικός υπολογισμός του δείκτη EEDI για τα δύο καύσιμα σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία.

$P_{\lambda\epsilon\iota\tau}/P_{on}$	$SFC_{HFO}$ [gr/kWh]	$SFC_{LNG}$ [gr/kWh]	$P_{PTI,HFO}$ [kW]	$P_{PTI,LNG}$ [kW]	$P_{AE,HFO}$ [kW]	$P_{AE,LNG}$ [kW]	$EEDI_{HFO}$	$EEDI_{LNG}$
0.20	230.28	192.52	5672.6	5046.8	959.1	864.5	4.43	3.17
0.30	220.08	184.01	9215.1	8701.0	1017.9	956.2	5.09	3.57
0.40	211.32	176.45	12686.5	12276.7	1042.9	997.3	6.00	4.23
0.50	204.00	169.85	16138.2	15827.9	1056.9	1020.8	6.78	4.82
0.60	198.12	164.21	19601.3	19387.7	1066.5	1036.8	7.47	5.32
0.70	193.68	159.53	23089.5	22971.2	1074.6	1049.1	8.21	5.82
0.75	192.00	157.54	24842.9	24771.9	1078.1	1054.3	8.59	6.09
0.80	190.68	155.80	26600.2	26576.6	1081.3	1059.0	8.89	6.32
0.81	190.25	155.17	27303.6	27589.1	1082.4	1060.6	8.97	6.39
0.82	189.88	154.57	27458.0	27292.6	1067.2	1062.3	8.96	6.43
0.90	189.12	153.02	27442.8	27442.8	1012.3	1012.3	8.90	6.36
1.00	189.00	151.21	27396.7	27396.7	934.9	934.9	8.86	6.26

Πίνακας 5.8: Υπολογισμός  $EEDI_{estimated}$  ανάλογα με το σημείο λειτουργίας των γεννητριών

Η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων (τιμές EEDI) του πίνακα 5.7 φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα 5.3



**Διάγραμμα 5.3:** Σχηματική απεικόνιση ενεργειακού δείκτη EEDI για ένα εύρος σημείων λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών.

Η παραπάνω θεωρία αναπτύχθηκε με την προϋπόθεση ότι λειτουργούν παράλληλα και οι 4 ηλεκτρογεννήτριες, παραλαμβάνοντας το ίδιο φορτίο. Όμως, στα πλοία με ηλεκτροπρόωση, σε αντίθεση με τα συμβατικά, μπορεί να μην λειτουργούν όλες οι γεννήτριες για να κινηθεί το πλοίο. Κρατώντας ανενεργή μία γεννήτρια, και αυξάνοντας το σημείο λειτουργίας των υπολοίπων, μπορεί να υπάρχουν διαφορετικά αποτελέσματα στους ενεργειακούς δείκτες. Πράγματι, όπως φαίνεται και στους πίνακες 5.9 και 5.10 οι τιμές του EEDI μειώνονται χαρακτηριστικά. Σημειώνεται ότι η σύγκριση των τιμών του EEDI έχει νόημα για την ίδια ταχύτητα είτε για λειτουργία 3 ή 4 γεννητριών.

Στον πίνακα 5.9 φαίνεται το παράδοξο ότι η χρήση 3 γεννητριών μπορεί, έστω και σε ακραίο σενάριο (100% σημείο λειτουργίας) να ικανοποιήσει τις ενεργειακές ανάγκες του πλοίου και την πρόωση υπό την υπηρεσιακή ταχύτητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι τέσσερις γεννήτριες του υπό μελέτη πλοίου έχουν επιλεγεί από την ναυτιλιακή εταιρία με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τις ανάγκες του πλοίου στην υπηρεσιακή ταχύτητα στο 74% περίπου της ονομαστικής τους ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ ΣΕ LNG CARRIER

$P_{\lambda\epsilon\iota\tau}/P_{on}$	$P_{gen}$ [kW]	$P_{propHFO}$ [kW]	$P_{propLNG}$ [kW]	$V_{s,HFO}$ [kn]	$V_{s,LNG}$ [kn]
0.30	7897.5	6024.8	5335.0	13.1	12.2
0.40	10530.0	8589.3	7899.0	15.3	14.8
0.45	11846.3	9871.6	9181.1	15.9	15.6
0.50	13162.5	11153.8	10463.4	16.4	16.1
0.55	14478.8	12435.1	11745.7	16.9	16.6
0.60	15795.0	13717.3	13027.9	17.3	17.0
0.65	17111.3	14999.6	14309.2	17.7	17.5
0.70	18427.5	16281.8	15591.4	18.1	17.9
0.75	19743.8	17563.1	16873.7	18.5	18.3
0.80	21060.0	18845.3	18155.9	18.9	18.7
0.85	22376.3	20127.6	19437.2	19.2	19.1
0.90	23692.5	21409.8	20719.4	19.5	19.4
0.95	25008.8	23691.1	22001.7	19.7	19.6
1.00	26325.0	23973.3	23283.9	19.9	19.8

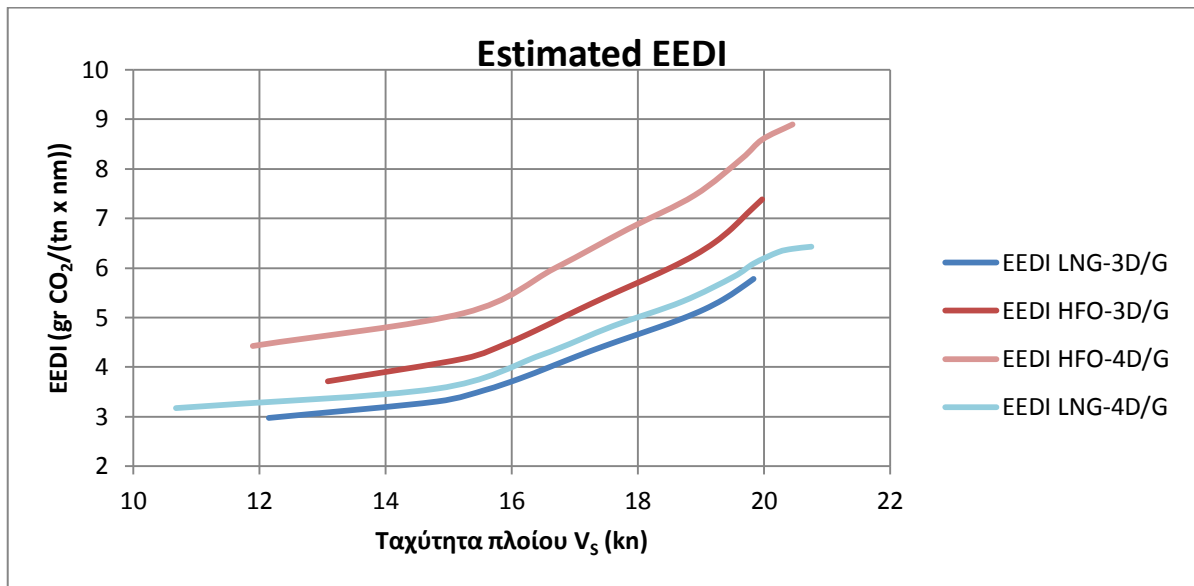
Πίνακας 5.9: Υπολογισμός ταχύτητας με 3 γεννήτριες σε λειτουργία.

$P_{\lambda\epsilon\iota\tau}/P_{on}$	$SFC_{HFO}$ [gr/kWh]	$SFC_{LNG}$ [gr/kWh]	$P_{PTI,HFO}$ [kW]	$P_{PTI,LNG}$ [kW]	$P_{AE,HFO}$ [kW]	$P_{AE,LNG}$ [kW]	$EEDI_{HFO}$	$EEDI_{LNG}$
0.30	220.1	184.0	6464.7	5723.6	788.7	726.7	3.71	2.97
0.40	211.3	176.5	9074.8	8345.3	817.2	771.5	4.17	3.30
0.45	207.5	173.0	10371.3	9646.0	826.2	785.2	4.45	3.53
0.50	204.0	169.9	11667.1	10945.0	833.4	797.9	4.73	3.76
0.55	200.9	166.9	12965.8	12246.2	839.4	806.5	5.02	3.99
0.60	198.1	164.2	14267.3	13549.5	844.5	814.6	5.28	4.21
0.65	195.7	161.7	15573.5	14857.9	849.0	821.7	5.53	4.42
0.70	193.7	159.5	16884.6	16169.9	853.0	827.9	5.77	4.61
0.75	192.0	157.5	18200.1	17485.0	856.7	832.4	6.01	4.79
0.80	190.7	155.8	19518.5	18803.8	860.0	837.3	6.25	4.98
0.85	189.7	154.3	20837.7	20123.3	862.9	841.7	6.52	5.16
0.90	189.1	153.0	22154.7	21440.6	865.4	845.5	6.79	5.36
0.95	188.9	152.0	23465.6	22751.1	867.5	848.7	7.09	5.57
1.00	189.0	151.2	24765.0	24053.1	869.1	851.3	7.38	5.78

Πίνακας 5.10: Υπολογισμός  $EEDI_{estimated}$  για 3 γεννήτριες σε λειτουργία.

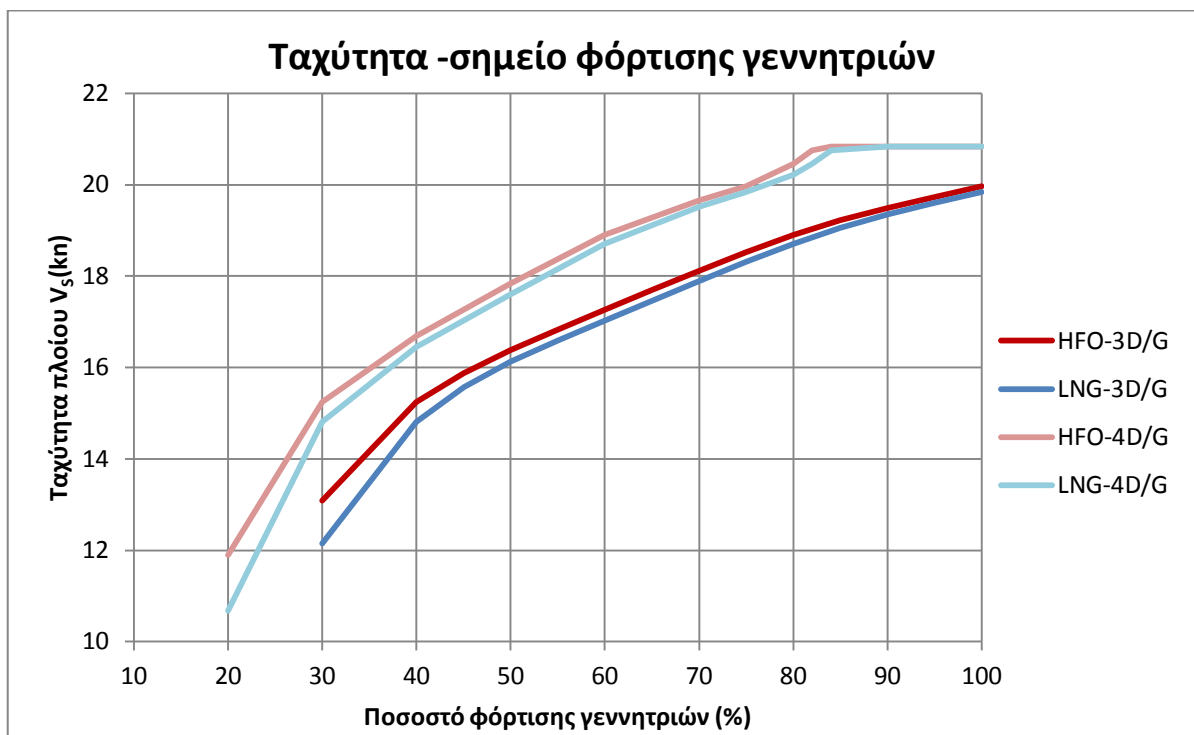
Αρκετό ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι υπάρχει αισθητή μείωση των δεικτών EEDI για λειτουργία 3 γεννητριών σε σχέση με 4, υπό ίδια ταχύτητα. Συγκεκριμένα η αύξηση του σημείου λειτουργίας και η ισοκατανομή του φορτίου σε λιγότερες μηχανές (εφόσον είναι εφικτό), μειώνει τον ενεργειακό δείκτη. Η πρακτική αυτή βρίσκει εφαρμογή σε καταστάσεις πλεύσης χαμηλότερων ταχυτήτων από την υπερηρειακή.

Αναλυτικότερα, φαίνονται συγκριτικά τα αποτελέσματα στο διάγραμμα 5.4.



**Διάγραμμα 5.4:** Σύγκριση δείκτη EEDI για λειτουργία 3 και 4 γεννητριών για ένα εύρος σημείων λειτουργίας ταχυτήτων

Το διάγραμμα 5.5 συμπληρώνει το διάγραμμα 5.4. Στο διάγραμμα 5.5. παρουσιάζεται το ποσοστό φόρτισης των γεννητριών (τριών ή τεσσάρων) για να επιτευχθεί κάθε φορά η απαιτούμενη ταχύτητα. Για τη λειτουργία με 4 γεννήτριες, η ταχύτητα δεν μπορεί να υπερβεί τους 20.9kn λόγω περιορισμού στην αποδιδόμενη ισχύ των κινητήρων πρόωσης. Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες του σχήματος είναι τόσο απότομες για ταχύτητες μικρότερες των 15kn, οφείλεται στο γεγονός ότι η μελέτη του κεφαλαίου 4 έγινε για ταχύτητες μέχρι 15.9kn



**Διάγραμμα 5.5:** Ταχύτητα πλοίου ανά σημείο φόρτισης για λειτουργία φόρτισης 3 ή 4 γεννητριών

Συνοψίζοντας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.4 οι διαφορές ανάμεσα στις τιμές του EEDI για το ίδιο καύσιμο, σε διαφορετικό σημείο φόρτισης των γεννητριών είναι σημαντικές. Πρέπει για το λόγο αυτό να τονιστεί η σημασία προσδιορισμού ενός ακριβέστερου και ορθότερου τύπου για τον υπολογισμό των ενεργειακών δεικτών από τον IMO. Οι υπάρχουσες οδηγίες υπολογισμού δεν ερμηνεύονται αμφιμονοσήμαντα και πολλές φορές όπως φαίνεται παραπάνω δεν αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα. Η ηλεκτροπρόωση, πρέπει να διαχωριστεί και να εξεταστεί ξεχωριστά από τη συμβατική πρόωση όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα.

### 5.3 Υπολογισμός δείκτη EEOI

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας για τη λειτουργία του υπό μελέτη πλοίου. Παρόλο που είναι γνωστό ότι ο δείκτης EEDI δεν εφαρμόζεται ακόμη σε ηλεκτροκίνητα πλοία, έγινε μια πρώτη προσέγγιση του δείκτη για πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με ηλεκτροπρόωση. Δυστυχώς, δεν υπήρχε πρόσβαση σε κατανάλωση καυσίμου, εκπεμπόμενους ρύπους, και ταχύτητα πλεύσης. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός σε αυτήν την περίπτωση γίνεται προχωρώντας σε υποθέσεις σχετικά με τα εμπλεκόμενα στο δείκτη μεγέθη. Τα εμπλεκόμενα μεγέθη είναι η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων του διοξειδίου του άνθρακα ( $m_{CO_2}$ ) σε τόνους (t), η ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου ( $m_{cargo}$ ) σε τόνους (t) και η διανυθείσα απόσταση (D) σε ναυτικά μίλια (nm). Επομένως γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη EEOI σύμφωνα με τη γνωστή σχέση:

$$EEOI = \frac{m_{CO_2}}{m_{CARGO} \cdot D}$$

Αρχικά, θεωρείται ότι το πλοίο κινείται με την υπηρεσιακή του ταχύτητα 19.9kn για 15 ημέρες. Σε ότι αφορά το  $m_{CARGO}$ , αυτό θα είναι η ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου (DWT= 90327.7t). Τέλος, η μόνη πληροφορία για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> μπορεί να αντληθεί από το project guide της κατασκευάστριας μηχανής. Οι τιμές φαίνονται στον πίνακα 5.11.

Typical emission levels (gas)	100% load	75% load
CO <sub>2</sub> [g/kWh]	430	450

Πίνακας 5.11: Επίπεδα εκπομπών CO<sub>2</sub> για την μηχανή 9L50DF

Από βιβλιογραφική μελέτη προκύπτει (όπως υπάρχει και στο σχήμα 1.6 του κεφαλαίου 1) ότι οι εκπομπές σε CO<sub>2</sub> για κατανάλωση H.F.O. είναι κατά 23% μεγαλύτερο σε σχέση με αυτές του φυσικού αερίου. Τέλος, εφόσον δεν υπάρχουν κάποιες πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας, ώστε να είναι γνωστή η ισχύς, θα ληφθεί αυτή που προκύπτει από τον ηλεκτρολογικό ισολογισμό. Επομένως :

- ✓ Μεταφερόμενο φορτίο = 90327.7t
- ✓ Διάρκεια ταξιδιού= 15 ημέρες
- ✓ Ποσοστό ισχύος λειτουργίας: 82% για κατανάλωση HFO  
Ποσοστό ισχύος λειτουργίας: 84.02% για κατανάλωση BOG
- ✓ Ειδική εκπομπή ρύπων CO<sub>2</sub> για HFO = 546.61gr/kWh  
Ειδική εκπομπή ρύπων CO<sub>2</sub> για BOG = 442.78 gr/kWh
- ✓ Ισχύς λειτουργίας για κατανάλωση HFO =28782kW  
Ισχύς λειτουργίας για κατανάλωση BOG =29491kW
- ✓ Ποσότητα εκπεμπόμενων CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια ταξιδιού HFO= 5662.8t

- ✓ Ποσότητα εκπεμπόμενων CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια ταξιδιού BOG= 4698t
- ✓ Ταχύτητα για χρήση HFO=20.75kn από πίνακα 4.16
- ✓ Ταχύτητα για χρήση BOG=20.75kn από πίνακα 4.16
- ✓ Διανυθείσα απόσταση =7470nm

**Οπότε:**

$$EEOI_{HFO} = 8.39 \times 10^{-6} \text{ CO}_2 / (\text{tn} \times \text{nm})$$

$$EEOI_{BOG} = 6.96 \times 10^{-6} \text{ tn CO}_2 / (\text{tn} \times \text{nm})$$

Το αποτέλεσμα παρόλο που βασίζεται σε θεωρητική προσέγγιση και δεν εμπεριέχει τους πραγματικούς ρύπους του πλοίου προσεγγίζει την τιμή ομοίων με το υπό μελέτη.

## 5.4 Κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών

Στην παράγραφο αυτή υπολογίζεται η κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών. Το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται είναι είτε βαρύ πετρέλαιο (HFO) είτε η ποσότητα του εξατμιζόμενου, με φυσικό τρόπο, αερίου, η οποία δεν θα επαναϋγροποιηθεί (BOG). Η ειδική κατανάλωση καυσίμου, δηλαδή η ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται σε ορισμένη χρονική περίοδο προς τη μηχανική ενέργεια που αποδίδει η μηχανή, δίνεται συναρτήσει του σημείου φόρτισης από το project guide της μηχανής.

### 5.4.1 Κατανάλωση καυσίμου

Ο πίνακας 5.1 από το εγχειρίδιο της ηλεκτρομηχανής μας δίνει την ειδική κατανάλωση σε 3 σημεία φόρτισης. Για το υπό μελέτη πλοίο θα εξεταστούν οι καταστάσεις λειτουργίας που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.12. Στον πίνακα 5.12 που προκύπτει από ηλεκτρολογικό ισολογισμό αναγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις σε κάθε κατάσταση, το σημείο φόρτισης των γεννητριών και ο αριθμός αυτών που είναι σε λειτουργία. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύ όπως αναφέρθηκε είναι  $4 \times 8775\text{kW} = 35100\text{kW}$ . Η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης δεν λαμβάνεται υπόψιν.

	SEAGOING HFO LADEN	SEAGOING GAS LADEN	PORT IN/OUT WITH THRUSTER	CARGO LOAD	CARGO UNLOAD
Power in need [kW]	28940	29648	10174	3920	6329
Number of working D/G	4	4	2	1	1
%Load	82	84	58	45	72

**Πίνακας 5.12:** Αποτελέσματα ηλεκτρολογικού ισολογισμού



**Seagoing HFO LADEN**

Με τη χρήση του curve editor, προκύπτει από τον πίνακα 5.1 ότι η ειδική κατανάλωση  $SFC_{82\%} = 190.25 \text{ gr/kWh}$ . Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι βαρύ πετρέλαιο RMG-35 και έχει κατώτερη θερμογόνο  $H_u = 39500 \text{ kJ/kg}$ . Η ειδική κατανάλωση θα πρέπει να υποστεί κάποιες διορθώσεις που σχετίζονται τόσο με την παρέκκλιση των συνθηκών λειτουργίας από τις πρότυπες όσο και με την διαφορά της θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου σε σχέση με αυτή που δίνεται από τον κατασκευαστή. Η παραπάνω κατανάλωση αφορά καύσιμο κατώτερης θερμογόνου ικανότητας  $H_u = 42.700 \text{ kJ/kg}$ . Επομένως η ειδική κατανάλωση γίνεται:

$$SFC' = SFC \cdot \frac{42700}{39550} = 205.40 \text{ gr/kWh}$$

Η παραπάνω διόρθωση προτείνεται από τον κατασκευαστή. Η επόμενη διόρθωση αφορά τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής που παρεκκλίνουν από αυτές που ορίζονται από το πρότυπο ISO. Οι πρότυπες συνθήκες είναι οι εξής:

- ✓ Θερμοκρασία περιβάλλοντος  $25^\circ \text{ C}$
- ✓ Ατμοσφαιρική πίεση 1 bar
- ✓ Θερμοκρασία νερού  $25^\circ \text{ C}$

Οι διορθώσεις στην κατανάλωση καυσίμου σε αυτήν περίπτωση είναι:

- ✓ Αύξηση της κατανάλωσης κατά 0.2-1% για κάθε  $10^\circ \text{ C}$  αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα
- ✓ Αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 0.2-0.6% για κάθε  $10^\circ \text{ C}$  αύξησης της θερμοκρασίας του νερού ψύξης.

Θεωρείται ότι οι γεννήτριες αναρροφούν αέρα απευθείας από το μηχανοστάσιο, σε μέση θερμοκρασία  $35^\circ \text{ C}$ . Η θερμοκρασία του νερού θεωρείται  $35^\circ \text{ C}$ . Η κατασκευαστική ανακρίβεια είναι της τάξης του 3%.

Οπότε:

$$SFC'' = 205.4 \cdot \left( 1 + \left( \frac{0.006 \cdot (35 - 25)}{10} \right) \right) \cdot \left( 1 + \left( \frac{0.004 \cdot (35 - 25)}{10} \right) \right) = \frac{207.45 \text{ gr}}{\text{kWh}}$$

Τέλος, απαιτείται διόρθωση λόγω κατασκευαστικής ανακρίβειας της τάξης του 3%.

Οπότε:

$$SFC''' = 207.45 \cdot 1.03 = \frac{213.58 \text{ gr}}{\text{kWh}}$$

Οπότε η ημερήσια κατανάλωση HFO σε κατάσταση SEAGOING HFO LADEN είναι :

**147.6 tons/day**

**Seagoing GAS LADEN**

Σε αυτήν την κατάσταση πλεύσης, η οποία είναι και η επικρατούσα, χρησιμοποιείται ως καύσιμο το εξατμιζόμενο από τις δεξαμενές φορτίου φυσικό αέριο το οποίο και δεν θα επαναύγροποιηθεί. Από τον πίνακα 5.12 προκύπτει ότι το σημείο λειτουργίας των γεννητριών είναι 84%. Από τον πίνακα 5.1, με χρήση του curve editor προκύπτει ότι η ειδική κατανάλωση σε αυτό το σημείο λειτουργίας είναι  $SFC_{84\%}=7419.22\text{kJ/kWh}$ . Για αναφερόμενη κατώτερη θερμογόνο δύναμη  $H_u= 50000\text{kJ/kg}$  προκύπτει  $SFC= 148.38\text{g/kWh}$ . Όπως και προηγουμένως, θα πρέπει η παραπάνω ειδική κατανάλωση να διορθωθεί λόγω διαφορετικής κατώτερης θερμογόνου δύναμης, διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας κατά ISO και λόγω ανοχών από τους κατασκευαστές.

Η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου είναι  $H_u=48400\text{kJ/kg}$ . Οι πρότυπες συνθήκες λειτουργίας κατά ISO 15550 είναι:

- ✓ Θερμοκρασία περιβάλλοντος 25° C
- ✓ Ατμοσφαιρική πίεση 1 bar
- ✓ Θερμοκρασία νερού 35° C (διαφορετική από την προτεινόμενη κατά ISO)

Η λαμβανόμενη ανοχή από τους κατασκευαστές θεωρείται της τάξης του 3% ενώ οι συνθήκες λειτουργίας σε αυτή την περίπτωση θα θεωρηθούν όμοιες με αυτές της SEAGOING HFO LADEN.

Οπότε η τελική τιμή της ειδικής κατανάλωσης στην κατάσταση SEAGOING GAS LADEN είναι

$$SFC = \frac{158.83\text{gr}}{\text{kWh}}$$

Οπότε η ημερήσια κατανάλωση φυσικού αερίου σε κατάσταση SEAGOING GAS LADEN είναι :

**112.4 tons/day**

**PORT IN/OUT WITH THRUSTER**

Η κατανάλωση καυσίμου κοντά στο λιμάνι εξαρτάται από το υπάρχον καθεστώς που αφορά τους εκπεμπόμενους ρύπους. Τα ευρωπαϊκά λιμάνια έχουν περιορισμούς λόγω περιορισμών  $SO_x$ . Για το λόγο, αυτό θα υπολογιστεί η κατανάλωση που αφορά μόνο καύσιμο φυσικού αερίου. Από τον πίνακα 5.9, προκύπτει ότι το ποσοστό φόρτισης των ηλεκτρογεννητριών αντιστοιχεί σε 55.2% , ενώ χρησιμοποιούνται 2 μόνο γεννήτριες. Μετά από τις αντίστοιχες διορθώσεις, η ειδική κατανάλωση είναι :

$$SFC = \frac{160.11\text{gr}}{\text{kWh}}$$

Οπότε η ημερήσια κατανάλωση φυσικού αερίου σε κατάσταση Port in/out with thruster είναι :

**39.9tons/day**

Είναι εύλογο ότι η χρονική διάρκεια της κατάστασης αυτής είναι περιορισμένη, της τάξης 1-2 ωρών και όχι ημερών όπως αναγράφεται παραπάνω

**CARGO LOAD**

Η κατανάλωση καυσίμου σε κατάσταση φόρτωσης περιορίζει την χρήση καυσίμου φυσικού αερίου. Απαιτείται μία πλήρη καταγραφή από τους τοπικούς φορείς της ποσότητας του φορτίου που χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο στο λιμάνι και για το λόγο αυτό η χρήση αερίου περιπλέκει τις διαδικασίες. Λόγω των περιορισμών σε εκπομπές θείου, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο καύσιμο diesel ή αν δεν υπάρχει περιορισμός HFO. Λειτουργούν 2 μηχανές στο 43.1% της ονομαστικής του ισχύος. Μετά από τις αντίστοιχες διορθώσεις, η ειδική κατανάλωση είναι :

$$SFC = \frac{234.14gr}{kWh}$$

Οπότε η ημερήσια κατανάλωση καυσίμου diesel σε κατάσταση Cargo Load είναι :

**42.5tons/day****CARGO UNLOAD**

Η κατάσταση εκφόρτωσης είναι όμοια με αυτή της φόρτωσης, με τη διαφορά ότι λειτουργεί μία μόνο ηλεκτρογεννήτρια, στο 70.5% της ονομαστικής ισχύος της. Η ειδική κατανάλωση μετά τις διορθώσεις είναι:

$$SFC = \frac{216.87gr}{kWh}$$

Οπότε η ημερήσια κατανάλωση καυσίμου diesel σε κατάσταση Cargo Unload είναι :

**32.2tons/day****5.4.2 Κατανάλωση λιπαντικών**

Οι ποσότητες του καταναλισκόμενου λαδιού είναι πολύ μικρότερες αυτών του καυσίμου, και για το λόγο αυτό υπολογίζονται σε ετήσια βάση. Θεωρείται μία μέση λειτουργία των γεννητριών, η οποία αντιστοιχεί στο 75% της ονομαστικής του ισχύος. Η ειδική κατανάλωση προκύπτει από το project guide (0.5g/kWh) της κατασκευάστριας εταιρίας. Οπότε, στην περίπτωση αυτή η ετήσια κατανάλωση κυλινδρελαίου ισούται:

**88.5tons/year**

Για το λάδι κυκλοφορίας καθώς και το λάδι λοιπών χρήσεων δεν διατίθενται κάποιες πληροφορίες. Υποτίθεται με βάση τη βιβλιογραφία ειδική κατανάλωση ίση με 0.75kg/kW-year .Οπότε, στην περίπτωση αυτή η ετήσια κατανάλωση είναι :

**15tons/year**

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ενότητας αυτής παρουσιάζονται στον πίνακα 5.13.

<b>Κατανάλωση καυσίμου</b>				
Κατάσταση Φόρτωσης	Αριθμός μηχανών εν λειτουργία	Σημείο φόρτισης γεννητριών	Είδος καυσίμου	Κατανάλωση tons/day
SEAGOING HFO LADEN	4	82	HFO	147.6
SEAGOING GAS LADEN	4	84.02	GAS	112.4
PORT IN/OUT WITH THRUSTER	2	55.23	GAS	39.9
CARGO LOAD	2	43.09	MDO	42.5
CARGO UNLOAD	1	70.55	MDO	32.2
<b>Κατανάλωση λιπαντικών</b>				
Κυλινδρέλαιο	88.5 tons/year			
Λάδι λοιπών χρήσεων	15tons/year			

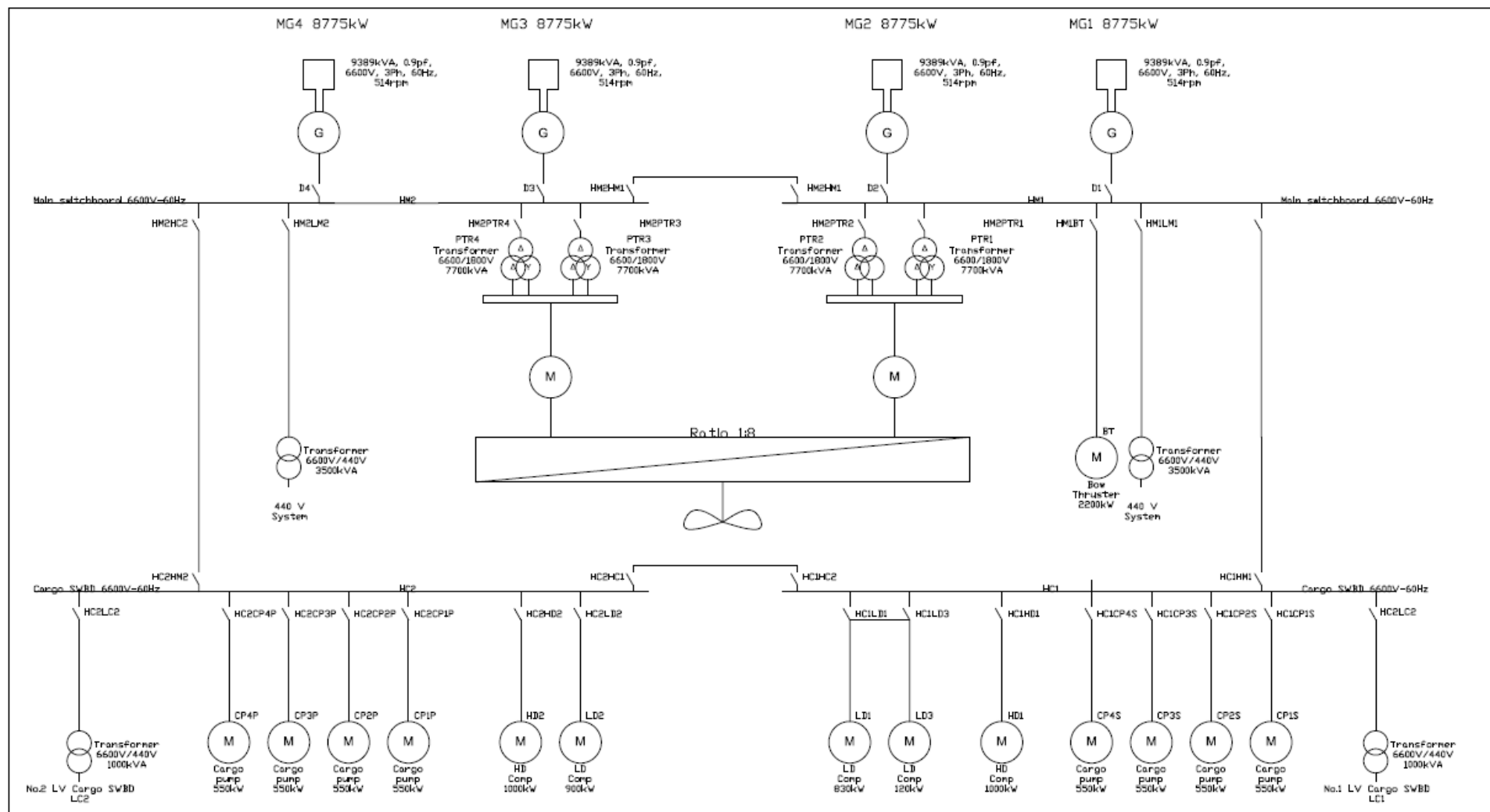
**Πίνακας 5.13:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης καυσίμων & λιπαντικών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως τα σημεία λειτουργίας που επιλέχθηκαν προκύπτουν από τον ηλεκτρικό ισολογισμό. Σε πραγματικές συνθήκες όμως η ταχύτητα πλεύσης και κατά συνέπεια το ποσοστό φόρτισης των μηχανών εξαρτάται από τη συμφωνία ανάμεσα στον ναυλωτή και την εκάστοτε ναυτιλιακή εταιρία. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για το παρόν πλοίο οι γεννήτριες, σε κατάσταση πλεύσης λειτουργούν στο 65% περίπου της ονομαστικής τους ισχύος.

## 5.5 Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης

Η παρούσα ενότητα πραγματεύεται το βάρος του μηχανολογικού εξοπλισμού του πλοίου με ηλεκτροπρώση. Λόγω της βαρύτητας των καλωδιώσεων σε πλήρως εξηλεκτρισμένα πλοία παρουσιάζεται το συνολικό μήκος και το βάρος τους. Έμφαση δίνεται κυρίως στα βασικά μέρη που συμμετέχουν στην πρόωση του πλοίου. Το πλοίο λειτουργεί σε δύο επίπεδα τάσεων. Το ένα υψηλής τάσης, 6600V, τροφοδοτεί τους κινητήρες πρόωσης (2), τις αντλίες φορτίου(8), τους συμπιεστές υψηλής ταχύτητας (2),τους συμπιεστές χαμηλής ταχύτητες (3) και τον πλευρικό προωστήριο μηχανισμό (bow thruster). Το δεύτερο, στα 440V, τροφοδοτεί όλους τους υπόλοιπους καταναλωτές. Στο διάγραμμα 5.6 παρουσιάζεται το δίκτυο υψηλής τάσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ ΣΕ LNG CARRIER



Διάγραμμα 5.6: Δίκτυο Υψηλής Τάσης ηλεκτροκίνητου πλοίου

Στο διάγραμμα 5.6 παρουσιάζονται :

- ✓ 4 σύγχρονες γεννήτριες (G).
- ✓ 2 κύριοι ζυγοί τροφοδοσίας 6600V-60Hz που τροφοδοτούν τους κινητήρες πρόωσης και
- ✓ 2 κύριοι ζυγοί τροφοδοσίας 6600V-60Hz που τροφοδοτούν τις αντλίες φορτίου (M) και τους συμπιεστές υψηλής(M) και χαμηλής ταχύτητας(M).
- ✓ 2 κινητήρες πρόωσης (M) με τους αντίστοιχους μετασχηματιστές τάσεως και μετατροπείς συχνότητας
- ✓ Μειωτήρας με συντελεστή μείωσης 1:8
- ✓ 2 μετασχηματιστές τάσεως 6600V/440V 3500kVA
- ✓ 2 μετασχηματιστές τάσεως 6600V/440V 1000kVA

### 5.5.1 Βάρος μηχανημάτων

Στον πίνακα 5.14 παρουσιάζονται αναλυτικά τα εξεταζόμενα μηχανήματα, η κατασκευάστρια εταιρία, τα ονομαστικά χαρακτηριστικά τους, το βάρος ανά μονάδα και το συνολικό βάρος. Τονίζεται ότι ο πίνακας 5.14 δεν περιλαμβάνει πλήρως το μηχανολογικό εξοπλισμό του πλοίου, αλλά περιέχει ένα εύρος από τα βαρύτερα μηχανήματα.

Item	Maker-Type	Particulars	Number	Weight/unit (t)	Weight (t)
Diesel Generators	Wartisla 9L50DF	8775kW at 514 rpm 9389.0kVA AC 6600V x 60Hz	4	96	384
Alternators			4	37.1	148.4
Propulsion transformers	KOC Electric Co.. Ltd	6600/1880V,7700kVA	4	12.5	50
Frequency Converter	Converteam	13.6MW,15-90Hz	2	9	18
Propulsion motors	Converteam	13260kW at 651-720rpm	2	48	96
Reduction gearbox	Renk/ NDSH -4060	8.105:1	1	75	75
<b>Total (t)</b>			<b>771.4</b>		

Πίνακας 5.14: Προωστήρια μηχανήματα ηλεκτροκίνητου πλοίου

Είναι φανερό ότι στον πίνακα 5.14 θα μπορούσαν να προστεθούν μηχανήματα τα οποία αλληλεπιδρούν με τα παραπάνω και συμβάλλουν στην πρόωση του πλοίου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι αντλίες λαδιού, πετρελαίου και οι συμπιεστές. Λόγω όμως του μικρού βάρους τους έχουν αποκλειστεί. Στον πίνακα 5.15 φαίνονται ορισμένα από τα υπόλοιπα μέρη του μηχανολογικού εξοπλισμού του πλοίου.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο προωστήριος εξοπλισμός έχει τη μεγαλύτερη βαρύτητα στον μηχανολογικό εξοπλισμό του ηλεκτροπροωθούμενου πλοίου. Πράγματι, είναι περίπου 5 φορές πιο βαρύτες σε σχέση με τα υπόλοιπα μηχανήματα του μηχανοστασίου όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.15.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ ΣΕ LNG CARRIER

Item	Maker-Type	Particulars	Number	Weight/unit (t)	Weight (t)
Cargo pump	SHINKO	1850m <sup>3</sup> /h	8	1.93	15.41
Aux. Boilers	Aalborg OS	6500kg/h	2	12.29	24.58
Economizer	Aalborg XS	2000kg/h	2	10.40	20.80
Purifier HFO	Westfalia OSE 40	7800l/h	3	1.05	3.15
Purifier L.O.	Westfalia OSE 20	3500m <sup>3</sup> /h	2	0.31	0.62
Gas Combustion system	Harmworth	-	1	26.50	26.50
Control Air Compressor	Tamrotor Marine	350 m <sup>3</sup> /h x 8bar	2	0.73	1.46
Service Air Compressor	Tamrotor Marine	350 m <sup>3</sup> /h x 8bar	2	0.73	1.46
Main Air compressor	Sauer	120 m <sup>3</sup> /h x 30bar	2	0.44	0.88
Incinerator	Teamtec AS	1495kW x 1285700 kcal/h	1	4.45	4.45
Fresh Water Generators	Alfa Laval	30m <sup>3</sup> /day	2	1.44	2.88
Boiler Water Circ Pump	Shinko/BT40-5	20m <sup>3</sup> /h	4	0.18	0.70
Bilge Water Separator	Blohm+Voss/TMPB5	5m <sup>3</sup> /h	1	0.24	0.24
Sludge Pump	IMO AB	20m <sup>3</sup> /h	2	0.11	0.11
HFO Pump	IMO AB	50m <sup>3</sup> /h	3	0.24	0.71
MDO Pump	IMO AB	50m <sup>3</sup> /h	1	0.24	0.24
LO transfer Pump	IMO AB	10m <sup>3</sup> /h	2	0.24	0.48
Cargo Compressor	Cryostar	-	1	9.41	9.41
Nitrogen Generator System	Asap	165Nm <sup>3</sup> /h	1	0.79	0.79
Ballast pump	Shinko/RVP 500MS	1200m <sup>3</sup> /h	2	0.48	0.96
By-pass ballast pump	Shinko/RVP 500MS	1200m <sup>3</sup> /h	1	0.96	0.96
Bilge Fire & G/S pump	Shinko/RVP 160MS	240/150m <sup>3</sup> /h	2	0.4	0.8
Inert Gas System generator	Harmworth	286/343 m <sup>3</sup> /h at 50/60Hz	1	0.59	0.59
Aux Cooling SW pump	Shinko/SVA400MS	1500m <sup>3</sup> /h	2	0.65	1.29
Main SW Pump	Shinko/SVA300M	770m <sup>3</sup> /h	3	0.28	0.84
Main FW Cooling	Shinko/RVP100M	40m <sup>3</sup> /h	2	0.05	0.10
E/R Diesel Generator	STX engine	850kW at 1800rpm	1	12.4	12.4
E/R Bilge pump	IMO AB	10m <sup>3</sup> /h	1	0.24	0.24
E/R Fire pump	IMO AB	10m <sup>3</sup> /h	1	0.4	0.4
<b>Total(t)</b>				<b>133.4</b>	

Πίνακας 5.15: Υπόλοιπα μηχανήματα ηλεκτροκίνητου πλοίου

### 5.5.2 Βάρος καλωδιώσεων

Στην αρχή της ενότητας αυτής έχει τονιστεί η σημασία της μελέτης των καλωδιώσεων σε πλοία με ηλεκτροπρόωση. Σε αντίθεση με τα συμβατικά πλοία όπου οι σωληνώσεις καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση και όγκο σε σχέση με τις καλωδιώσεις, στο υπό μελέτη πλοίο συμβαίνει το αντίστροφο και για το λόγο αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί το βάρος τους.

Η ένταση  $I_{yf}$ , που απαιτείται για τον προσδιορισμό της διατομής του καλωδίου και κατά συνέπεια του βάρους του υπολογίζεται με τις παρακάτω σχέσεις:

- γραμμή φωτισμού-ωμικού φορτίου:

$$I_{yf} = I_{\gamma}$$

- γραμμή που τροφοδοτεί μόνο έναν ηλεκτροκινητήρα:

$$I_{yf} = 1.25I_{\gamma}$$

Το ονομαστικό εναλλασσόμενο ρεύμα γραμμής  $I_{\gamma}$  μιας συσκευής προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

- Για μονοφασική παροχή:

$$I_{\gamma}[A] = \frac{P_{ov,απορροφ}[W]}{V[Volt] \cdot \cos\phi}$$

- Για τριφασική παροχή:

$$I_{\gamma}[A] = \frac{P_{ov,απορροφ}[W]}{V[Volt] \cdot \cos\phi \cdot \sqrt{3}}$$

όπου:

- ✓  $P_{ov,απορροφ}$  είναι η ονομαστική απορροφόμενη ισχύς,
- ✓  $V$  είναι η ονομαστική τάση του καταναλωτή και
- ✓  $\cos\phi$  ο συντελεστής ισχύος.

Τονίζεται ότι στην επιλογή των διατομών των καλωδίων των καταναλωτών χρησιμοποιούνται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του καταναλωτή (τάση, ρεύμα, συντελεστής ισχύος). Οι αναλυτικοί υπολογισμοί βρίσκονται στο παράρτημα Α. Στον πίνακα 5.16 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών.

Συνοψίζοντας, προκύπτει ότι για το υπό μελέτη πλοίο:

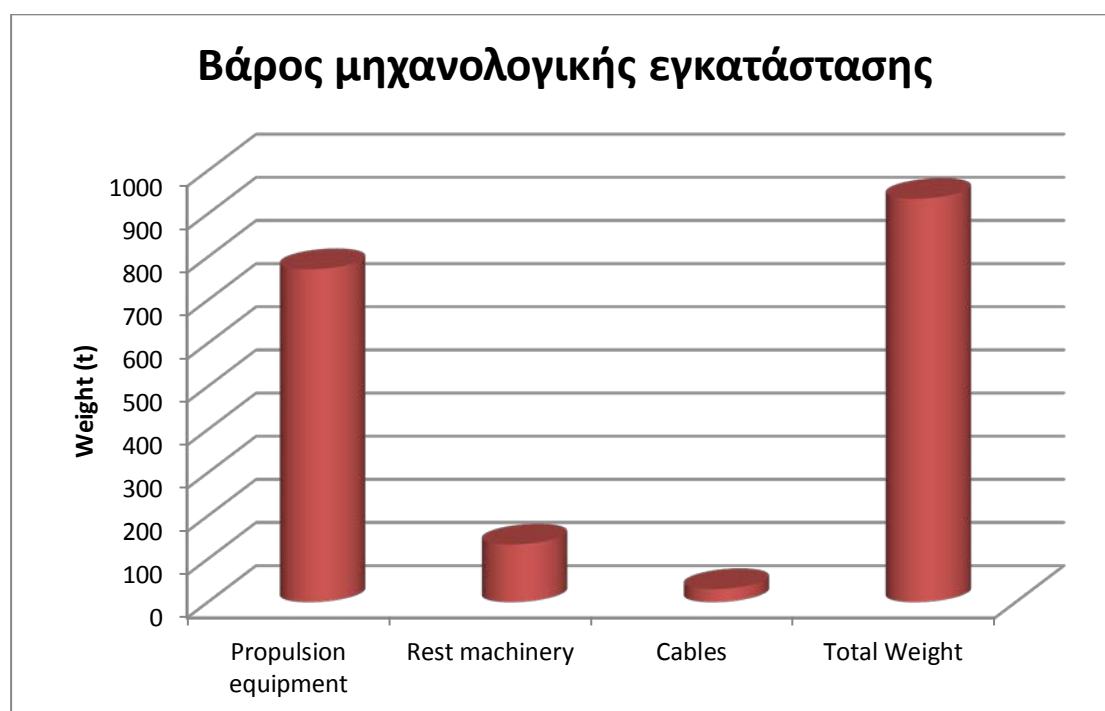
- Το συνολικό βάρος του μηχανολογικού εξοπλισμού ανέρχεται στους 904.8tons από τους οποίους το μεγαλύτερο μέρος οφείλεται στον προωστήριο εξοπλισμό
- Οι καλωδιώσεις έχουν συνολικό μήκος 10880μέτρα και βάρος περίπου 30 τόνων.



	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
Propulsion plant	613.6	2890.3
Generating plant	1219.5	385.5
Water handling equipment	478.8	1154.8
Oil handling equipment	807.1	345.3
Boiler plant	582.9	316.1
Other equipment in machinery space	908.6	1269.5
Cargo handling equipment	2070.5	8434.7
Ship system	345.2	1861.6
Manoeuvring equipment	1193.6	2944.9
Deck machinery	1004	8132.4
Air cond. & ventilation equipment	274.4	1821.2
Miscellaneous equipment	293.5	142.0
Lighting, nav & control equipment	147.0	233.2
<b>TOTAL</b>	<b>10880.1</b>	<b>29931.4</b>

Πίνακας 5.16: Συνολικό μήκος και βάρος καλωδιώσεων

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης της ενότητας 5.5 παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.7



Διάγραμμα 5.7: Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης πλοίου με ηλεκτροπρόωση

## 5.6 Οικονομική μελέτη

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθεί μια μελέτη οικονομικής σκοπιμότητας για το υπό μελέτη πλοίο. Συγκεκριμένα θα πραγματοποιηθεί εκτίμηση για τα εξής οικονομικά μεγέθη:

- Κόστος κτήσης πλοίου
- Κόστος λειτουργίας πλοίου
- Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος

Το κόστος κτήσης του πλοίου υποδιαιρείται σε:

- Κόστος μεταλλικής κατασκευής
- Κόστος ενδιαίτησης και εξοπλισμού
- Κόστος μηχανολογικής εγκατάστασης.

Τόσο το κόστος μεταλλικής κατασκευής όσο και αυτο της ενδιαίτησης και του εξοπλισμού θεωρείται ότι είναι αμετάβλητο για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση και για το ατμοκίνητο πλοίο. Το κόστος του ατμοστροβίλου και των λεβήτων από την μία, και τα έξοδα των ηλεκτροκινητήρων και των ηλεκτρογεννητριών από την άλλη είναι η κύρια διαφορά των δύο συστημάτων πρόωσης που επιδρούν στο κόστος της μηχανολογικής εγκατάστασης. Το κόστος λειτουργίας του πλοίου περιλαμβάνει:

- Κόστος αναλώσιμων, το οποίο περιλαμβάνει τα κόστη καυσίμων-λιπαντικών-νερού
- Λοιπά κόστη όπως: κόστος μισθοδοσίας, κόστος συντήρησης και επισκευών, κόστος ασφαλίσεως, έξοδα λιμένων και κάποια άλλα γενικά έξοδα

### 5.6.1 Κόστος ανέγερσης πλοίου

Στην παρούσα παράγραφο θα προσεγγιστεί το κόστος κτήσης του πλοίου. Βασική προϋπόθεση είναι η γνώση του βάρους του άφορτου σκάφους. Τα δεδομένα θα προκύψουν από το παράρτημα Β.

#### Κόστος μεταλλικής κατασκευής

Από το παράρτημα Β προκύπτει ο πίνακας 5.17.

$W_{ST}$ (t)	20413
$W_{OT}$ (t)	8869
$W_{invar}$ (t)	241
$V_{plywood}$ (m <sup>3</sup> )	11274

**Πίνακας 5.17:** Χρήσιμες τιμές για τους ακόλουθους υπολογισμούς από το παράρτημα Β

#### **Κόστος υλικών**

Για το κόστος της μεταλλικής κατασκευής

Ως τρέχουσα τιμή του χάλυβα λαμβάνεται  $K_{ST}=650\$/\text{ton}$  και φύρα της τάξης του 12%. Επομένως το κόστος μη επεξεργασμένου χάλυβα είναι:

$$C_{ST_{mats}} = W_{ST} \cdot K_{ST} + 0.12 \cdot W_{ST} \cdot K_{ST} = 14,860,664\$$$

### Κόστος εργασίας

Από βιβλιογραφία (Παπανικολάου Α.Δ. «Μελέτη Πλοίου, Μεθοδολογίες Προμελέτης», Αθήνα 2009) προκύπτει ότι το κόστος υλικών αντιστοιχεί στο 30% του συνολικού κόστους της μεταλλικής κατασκευής. Προκύπτει επομένως ότι

$$C_{ST_{work}} = \frac{0.7}{0.3} \cdot C_{ST_{mats}} = 34,674,883\$$$

Συνεπώς το κόστος μεταλλικής κατασκευής  $C_{ST}$  είναι : **49,535,547\$**

### Κόστος ενδίαίτησης και εξοπλισμού

Το κόστος των υλικών αποτελεί το 82% του συνολικού ενώ το 18% αποτελούν τα εργατικά (Παπανικολάου Α.Δ. «Μελέτη Πλοίου, Μεθοδολογίες Προμελέτης», Αθήνα 2009). Επειδή όμως, όπως αναφέρεται στο βάρος των υλικών της κατηγορίας αυτής εμπεριέχονται και οι μονώσεις πρέπει να γίνει αυστηρότερη μελέτη. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται τιμή Invar,  $K_{Invar}=13000\$/t$  και τιμή plywood  $K_{plywood}=300\$/m^3$ . Η τιμή για τα υπόλοιπα υλικά λαμβάνεται  $K_{OT}=6000\$/t$

Συνεπώς:

$$C_{OT,mat} = K_{OT} \cdot W_{OT}^{0.9} = 8,058,520\$$$

$$C_{INVAR} = K_{INVAR} \cdot W_{INVAR} = 3,133,000\$$$

$$C_{PLYWOOD} = K_{plywood} \cdot V_{plywood} = 3,382,200\$$$

$$C_{OT'MAT} = C_{OT,mat} + C_{INVAR} + C_{PLYWOOD} = 14,573,720\$$$

$$C_{OT,WORK} = \frac{0.18}{0.82} \cdot C_{OT'MAT} = 3,199,109\$$$

Οπότε το συνολικό κόστος ενδίαίτησης  $C_{OT}$  και εξοπλισμού είναι:

$$\mathbf{17,772,829\$}$$

### Κόστος μηχανολογικού εξοπλισμού

Το κόστος των υλικών αποτελεί το 85% του συνολικού κόστους του μηχανολογικού εξοπλισμού και το υπόλοιπο 15% αποτελούν τα εργατικά. Για το συγκεκριμένο πλοίο με ηλεκτροπρόωση οι τιμές του εξοπλισμού παρουσιάζονται στον πίνακα 5.18. Προφανώς και ο πίνακας 5.18 δεν αποτελεί καταγραφή του συνόλου των εξαρτημάτων του μηχανοστασίου, αλλά σίγουρα περιέχει τα πιο χαρακτηριστικά και ακριβά σημεία ενός ηλεκτροκίνητου πλοίου.

Item	Price per unit (\$)	No. units	Price (\$)
Propulsion Transformers	339000	4	1356000
Frequency Converters	452000	2	904000
Propulsion motors	565000	2	1130000
Main DF generator Engines	3107500	4	12430000
Alternators	452000	4	1808000
Shaft & propeller shaft	319506	1	319506
Steering gear	117000	1	117000
Aux. Boiler, Exhaust Gas Economizer	-		445000
Gas combustion Unit	-		900000

**Πίνακας 5.18**Κόστος μηχανημάτων ηλεκτροπρόωσης

Συνεπώς:

$$C_{MATERIALS} = 19,409,506\$$$

$$C_{M,WORK} = \frac{0.15}{0.85} \cdot C_{M,MATERIALS} = 3,425,206\$$$

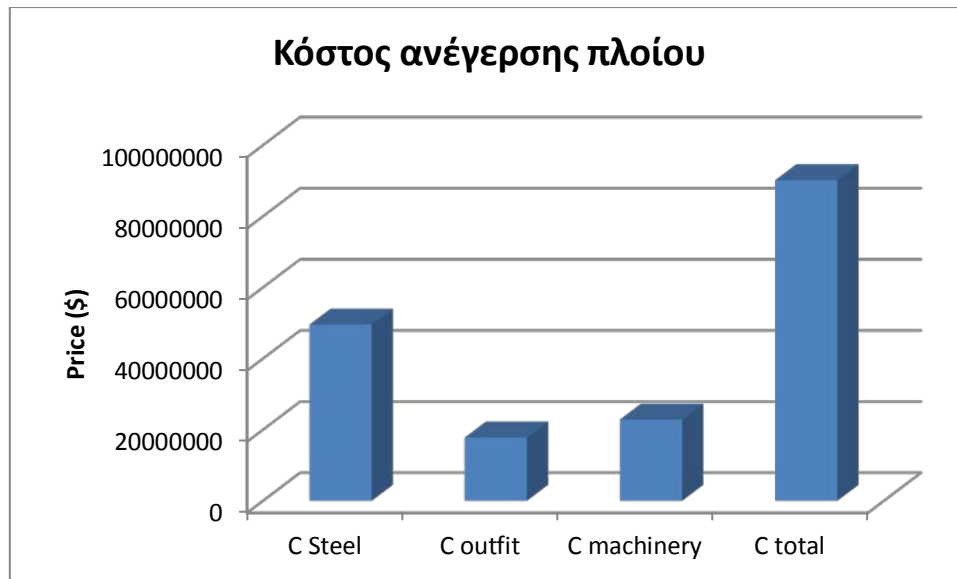
Οπότε το συνολικό κόστος της μηχανολογικής εγκατάστασης  $C_M$  ανέρχεται σε:

$$22,834,712\$$$

Συνεπώς προκύπτει ο πίνακας 5.19 ο οποίος συνοψίζει το συνολικό κόστος ανέγερσης του ηλεκτροπροωθούμενου πλοίου:

Κόστος ανέγερσης πλοίου		
	Συνολικό κόστος (\$)	$C_i/C_{TOTAL}$
$C_{ST}$	49535547	0.55
$C_{OT}$	17772830	0.20
$C_M$	22834712	0.25
$C_{TOTAL}$	90143089	-

**Πίνακας 5.19:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κόστους ανέγερσης ηλεκτροκίνητου πλοίου



Διάγραμμα 5.8: Γραφική αναπαράσταση κόστους ανέγερσης πλοίου με ηλεκτροπρόωση συναρτήσει του κόστους μεταλλικής κατασκευής-εξοπλισμού-μηχανημάτων

### 5.6.2 Λειτουργικά έξοδα πλοίου

Στο ακόλουθο σενάριο λειτουργίας υποτίθεται ότι το πλοίο εκτελεί κυκλικά ταξίδια στην ίδια διαδρομή και ο χρόνος πλεύσης παραμένει σταθερός. Ο χρόνος εισόδου και εξόδου από το λιμάνι λόγω φόρτωσης/εκφόρτωσης είναι περίπου 20h. Ο χρόνος ελιγμών υποτίθεται γύρω στις 2h ανά λιμάνι, οπότε 4h ανά κύκλο ταξιδιού. Η ακτίνα λειτουργίας του πλοίου είναι 14500nm και η ταχύτητα πλεύσης 19.9kn.

Επομένως:

$$t_{trip} = 2 \cdot \frac{A \cdot R}{V_S} + t_{cargo_{load/unload}} + t_{maneuvering} = 1481h = 61.72days$$

Θεωρείται ότι από τις 365 ημέρες, οι 15 διατίθενται σε επισκευές και δεξαμενισμούς. Συνεπώς το πλοίο πραγματοποιεί περίπου  $N_{trip}=5$  κυκλικά ταξίδια το χρόνο.

### Κόστος αναλώσιμων

Στο παρόν πλοίο επιτρέπεται να καεί ημερησίως το 0.125% του φορτίου (λόγω φυσικού βρασμού). Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί σε 99tons. Από την ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί στην 5.4.2 (πίνακας 5.12) απαιτούνται 112.4 tons/day. Επομένως η υπόλοιπη ποσότητα συμπληρώνεται με H.F.O. Στην κατάσταση πλεύσης ερματισμού καταναλώνεται μόνο καύσιμο H.F.O.

Συνεπώς στον κύκλο ενός ταξιδιού:

- cargo load (MGO): **17.7tons/trip**
- cargo unload (MGO): **13.4tons/trip**
- port in/out with thruster(GAS): **6.65tons/trip**
- seagoing GAS laden: **3005.6tons/trip**
- seagoing HFO laden: **5010.02tons/trip**

Οι τιμές των καυσίμων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.20. Για τα λιπαντικά έχει ληφθεί τιμή 1540\$/t

Τιμή καυσίμου	
Είδος καυσίμου	Κόστος [\$/t]
HFO	385
MGO	600
LNG	170

Πίνακας 5.20: Τιμές καυσίμων 21/2/2015 για το λιμάνι της Σιγκαπούρης

Τέλος από το stability booklet του πλοίου προκύπτει ότι το πλήρωμα ανέρχεται στα 45 άτομα. Υποθέτοντας κόστος 20\$/ανθρωποημέρα προκύπτει :

$$C_{PROVISIONS} = N_{CREW} \cdot N_{TRIP} \cdot 20 \cdot t_{trip} = 310,464\$$$

και από το capacity plan προκύπτει ότι οι δεξαμενές σε πόσιμο νερό αντιστοιχούν σε 420t. Υποθέτουμε τιμή 1\$/tn και ότι κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού καταναλώνονται όλοι αυτοί οι τόνοι. Επομένως:

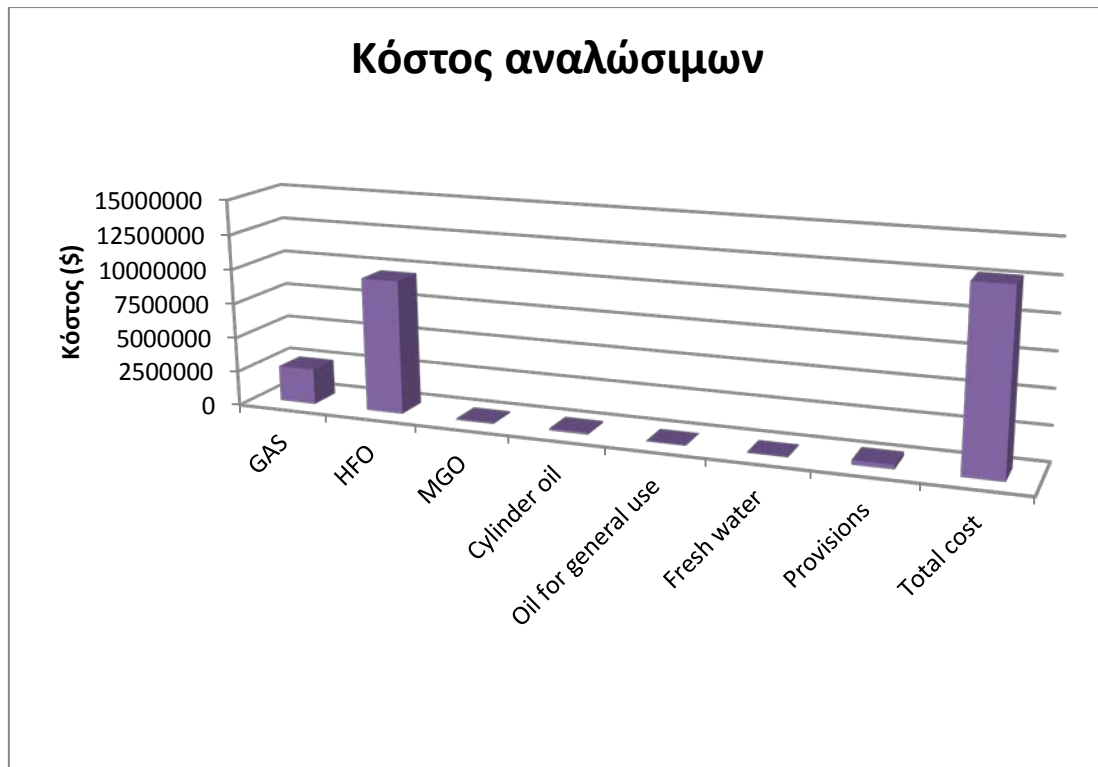
$$C_{FRESH\ WATER} = N_{TRIP} \cdot 1 \cdot 420 = 4200\$$$

Στον πίνακα 5.21 παρουσιάζονται οι καταναλώσεις καυσίμου & λιπαντικών (είχαν υπολογιστεί στον πίνακα 5.12 σε ετήσια βάση) λοιπών αναλώσιμων. Παρουσιάζεται τέλος και το κόστος σε ετήσια βάση.

Κόστος αναλώσιμων				
Είδος αναλώσιμου	Κατανάλωση ανά ταξίδι [t]	Κατανάλωση ανά έτος [t]	Τιμή [\$/t]	Ετήσιο κόστος [\\$]
GAS	3012.2	3120.15	170	2,560,370
HFO	5010.02	22750	385	9,644,288
MGO	31.1	155.5	600	93,300
Cylinder oil	-	88.5	1540	136,290
Oil for general use	-	15	1540	23,100
Fresh water	420	4200	1	4,200
Provisions	-	-		310,464
<b>Total cost[\\$]</b>				<b>12,772,012</b>

Πίνακας 5.21: Αναλυτικό κόστος αναλώσιμων

Στο διάγραμμα 5.9 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα του πίνακα 5.21 για το κόστος των αναλώσιμων.



Διάγραμμα 5.9: Αναλυτικό κόστος αναλώσιμων

#### Υπόλοιπα λειτουργικά έξοδα

##### **Κόστος μισθοδοσίας**

Το μέσο κόστος μισθοδοσίας του πληρώματος (ελληνική σημαία) ανέρχεται στα 3000\$/ (άτομο x μήνα). Συνεπώς το κόστος των μισθών ανά έτος είναι :

$$C_{salary} = N_{crew} \cdot 3000 \cdot 12 = 1,620,000\$$$

##### **Κόστος Λιμενικών Τελών**

Το κόστος λιμενικών τελών ανά λιμάνι προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$C_{PORT} = N_{TRIP} \cdot \left( 600 + 50 \cdot \left( L_{BP} \cdot B \cdot \frac{D}{10^5} \right) \right) = 69,479\$$$

με L,B,D σε [ft]

##### **Κόστος Ασφάλισης**

Το κόστος ασφάλισης προκύπτει:

$$C_{insurance} = 770 \cdot \left( N_{crew} + \frac{GT}{100} \right) = 834895\$$$

με GT=834895 τόνοι.

### Κόστος Συντήρησης

Το κόστος αυτής της κατηγορίας χωρίζεται στην ομάδα της συντήρησης της μεταλλικής κατασκευής και στην ομάδα της μηχανολογικής εγκατάστασης. Το ετήσιο κόστος της κατηγορίας προκύπτει:

$$C_{MAINTENANCE,ST} = 25000 \cdot \left( L_{BP} \cdot B \cdot \frac{D}{10^5} \right)^{\frac{2}{3}} = 588,873\$$$

$$C_{MAINTENANCE,MAC} = 5.44 \cdot P_B = 172,284\$$$

Συνεπώς το συνολικό κόστος συντήρησης ανέρχεται σε :

$$C_{MAINTENANCE} = 761,157\$$$

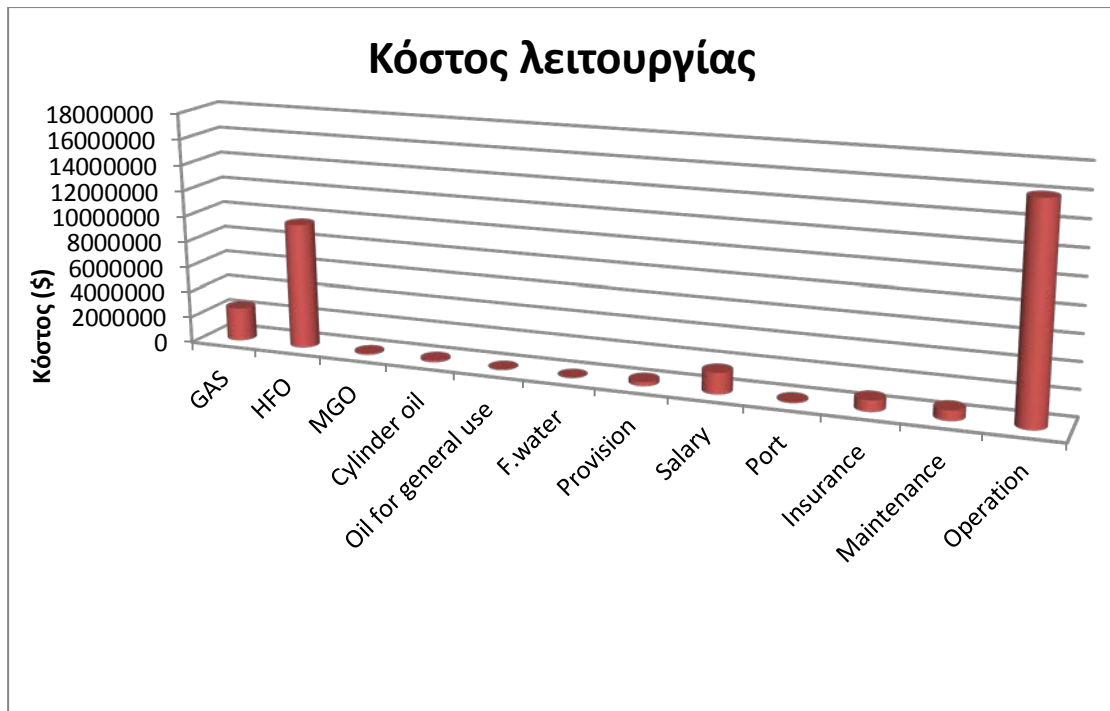
### Συνολικό κόστος λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας προκύπτει σαν άθροισμα όλο των παραπάνω και είναι :

$$C_{OPERATION} = 16,057,543\$$$

Στο διάγραμμα 5.10 παρουσιάζονται τα λειτουργικά έξοδα. Όπως ήταν αναμενόμενο το κόστος του πετρελαίου και του φυσικού αερίου αποτελούν τα κυριότερα έξοδα για τη λειτουργία του ηλεκτροκίνητου πλοίου.





Διάγραμμα 5.10: Κόστος λειτουργίας πλοίου φυσικού αερίου με ηλεκτροπρόωση

### 5.6.3 Καθαρή παρούσα αξία- Ελάχιστος ναύλος

Για τον υπολογισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου  $RFR$  πρέπει η Καθαρή Παρούσα Αξία να ισούται με μηδέν. Η Καθαρή Παρούσα Αξία δίνεται από τον τύπο:

$$Κ.Π.Α = \frac{\Pi_{20}}{(1+i)^N} - K_{\Pi} + (RFR \cdot \sum payload - E_{\Lambda} - \Delta) \cdot \sum_{j=1}^{20} (1+i)^{-N}$$

όπου:

- $\Pi_{20}$  : είναι η αξία του πλοίου στο τέλος διάρκειας ζωής του, και υπολογίζεται ως το 2.5% της αρχικής [\$]
- $i$  : είναι η προσδοκώμενη απόδοση του επενδυμένου κεφαλαίου.  $i=12\%$  στην προκειμένη περίπτωση.
- $K_{\Pi}$  : είναι το κεφάλαιο του πλοιοκτήτη. Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί ποσοστό του κόστους ανέγερσης του πλοίου σε περίπτωση που έχει ληφθεί κάποιο δάνειο [\$]
- $RFR$  : είναι ο ελάχιστος ναύλος [\$/t].
- $\sum payload$  : είναι το συνολικό μεταφερόμενο φορτίο στην διάρκεια ενός έτους [t]
- $E_{\Lambda}$  : τα ετήσια λειτουργικά έξοδα [\$]. Στην βιβλιογραφία τιτλοφορείται και ως **ORPEX (Operational Expenditure)** .
- $\Delta$  : η δόση του δανείου. Παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια ζωής του πλοίου. Στην βιβλιογραφία τιτλοφορείται και ως **CAPEX (Capital Expenditure)** .

Υπολογίζεται από τη σχέση:  $\Delta = \frac{r \cdot (1+r)^N}{(1+r)^{N-1}} * K_{\Delta}$

- ✓  $K_{\Delta}$  : το κεφάλαιο το οποίο θα καλυφτεί από τυχόν δάνειο
- ✓  $r$  : δανειακό επιτόκιο. Λαμβάνεται ίσο με 0.08

✓ N : Διάρκεια εκμετάλευσης του πλοίου. Λαμβάνεται ίση με 20 χρόνια

Στον πίνακα 5.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλογα με το δάνειο για την παραπάνω επένδυση.

Ποσοστό δανειοδότησης	CAPEX [\$]	RFR [\$/t]
100%	9181273	58.21
90%	8263145	58.89
80%	7345018	59.55
70%	6426891	60.22
60%	5508764	60.89
50%	4590636	61.55
40%	3672509	62.21
30%	2754382	62.88
20%	1836255	63.55
10%	918127	64.22
0%	0	64.89

**Πίνακας 5.22:** Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση.

Τέλος στον πίνακα 5.23 παρουσιάζονται οι δαπάνες κεφαλαίου και ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος υπό το σενάριο το κόστος του καταναλισκόμενου φυσικού αερίου να μην επιβαρύνει την ναυτιλιακή εταιρία, αλλά τον ναυλωτή. Τονίζεται ότι η ποσότητα του φυσικού αερίου που μπορεί να καταναλωθεί ημερησίως είναι αυτή που εξατμίζεται από τις δεξαμενές με φυσικό τρόπο.

Ποσοστό δανειοδότησης	CAPEX [\$]	RFR [\$/t]
100%	9181273	52.30
90%	8263145	52.97
80%	7345018	53.63
70%	6426891	54.30
60%	5508764	54.97
50%	4590636	55.63
40%	3672509	56.30
30%	2754382	56.97
20%	1836255	57.64
10%	918127	58.31
0%	0	58.93

**Πίνακας 5.23:** Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος του φυσικού αερίου επιβαρύνει τον ναυλωτή.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΩΩΣΗΣ ΜΕ ΑΤΜΟ ΣΕ LNG CARRIER****6.1 Γενικά στοιχεία**

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται τη μεταφορά φυσικού αερίου σε πλοία που χρησιμοποιούν ατμό για την πρόωσή τους. Όπως και στο όμοιο πλοίο με ηλεκτροπρόωση θα υπολογιστεί οι δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας EEDI, η κατανάλωση καυσίμου (BOG-HFO) και λιπαντικών και το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης. Τέλος, παρατίθεται το κόστος για την ανέγερση του πλοίου, τη λειτουργία του, καθώς και ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος.

Ο δείκτης EEDI για τα πλοία που κινούνται με ατμό, σε αντίθεση με τα πλοία με ηλεκτροπρόωση, είναι πλήρως ορισμένος. Αφού υπολογιστεί θα συγκριθεί με τις υπάρχουσες γραμμές αναφοράς. Οι λέβητες που τροφοδοτούν τους ατμοστροβίλους με τον απαραίτητο ατμό για την πρόωση, μπορούν να καταναλώσουν είτε φυσικό αέριο είτε βαρύ πετρέλαιο. Στο παρόν πλοίο καταναλώνεται το φυσικό αέριο το οποίο εξατμίζεται με φυσικό τρόπο και τυχόν ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται με την καύση του πετρελαίου. Στην συνέχεια θα υπολογιστούν οι καταναλώσεις των παραπάνω καυσίμων.

Τέλος, θα παρατεθεί μία λίστα με το βάρος των κυριότερων μηχανημάτων του μηχανοστασίου. Οι δείκτες που αφορούν την επένδυση για την κατασκευή τον εξοπλισμό και τη λειτουργία του πλοίου, κλείνουν το παρόν κεφάλαιο.

**6.2 Υπολογισμός δείκτη EEDI**

Σύμφωνα με τις οδηγίες MEPC.245 April 2014 η εξίσωση της παραγράφου 1.4.1 για τον υπολογισμό του δείκτη EEDI σε πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου με χρήση στροβίλου ατμού επιδέχεται ορισμένες μετατροπές. Συγκεκριμένα ο εκτιμώμενος δείκτης προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο :

$$Estimated\ EEDI = \frac{P_{ME} \cdot C_F \cdot SFC + P_{AE} \cdot C_F \cdot SFC}{Capacity \cdot V_{ref}}$$

όπου:

- ✓  $P_{ME}$ : Ορίζεται ως το 75% της εγκατεστημένης ισχύος πρόωσης
- ✓  $P_{AE}$ : Για πλοία των οποίων οι ηλεκτρογεννήτριες κινούνται με ατμό ο όρος αυτός λαμβάνει την τιμή 0.
- ✓ Οι ποσότητες  $C_F$ ,  $Capacity$ ,  $V_{ref}$  ορίζονται όπως στην παράγραφο 1.4.1
- ✓  $SFC$ : Για πλοία τα οποία φέρουν φυσικό αέριο, θα πρέπει η ειδική κατανάλωση να διορθωθεί με τις πρότυπες συνθήκες για χρήση αερίου ( $H_u=48.000\text{kJ/kg}$ ). Η τιμή της ειδικής κατανάλωσης λαμβάνει τιμή από τον ακόλουθο τύπο:

$$SFC_{Steam\ Turbine} = \frac{Fuel\ Consumption}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$$

όπου:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΩΣΗΣ ΜΕ ΑΤΜΟ ΣΕ LNG CARRIER

- η κατανάλωση καυσίμου αντιστοιχεί στην κατανάλωση καυσίμου των λεβήτων ανά ώρα (g/h)
- ο όρος  $P_{ME}$  αναφέρεται στην ισχύ του στροβίλου που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη κατανάλωση καυσίμου.

Για το υπό μελέτη πλοίο η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αντιστοιχεί σε 27066kW. Η αποδιδόμενη ισχύς κατανέμεται ανάμεσα σε ένα στρόβιλο χαμηλής και έναν υψηλής πίεσης. Υπάρχουν δύο όμοιοι λέβητες που εξυπηρετούν τις ανάγκες σε υπέρθερμο και αφυπέρθερμο ατμό. Η παροχή καυσίμου δίνεται από το machinery operating manual του μελετώμενου πλοίου για κάθε είδος καυσίμου (HFO-BOG). Από το μονογραμμικό διάγραμμα του πλοίου διαπιστώνεται ότι η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μέσω δύο όμοιων στροβιλογεννητριών ισχύος 3450kW και μίας γεννήτριας κινούμενης με καύσιμο diesel ισχύος 3.450kW. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του δείκτη EEDI.

Ship type	LNG-carrier with Steam propulsion	
DWT (t)	84776.5	
$V_S$ (kn)	19	
$P_{ME}$ (kW)	20299.5	
$P_{AE}$ (kW)	0	
Fuel type	HFO	LNG
$C_F$ (gr CO <sub>2</sub> /gr fuel)	3.1144	2.75
SFC <sub>75%</sub> (gr/kWh)	267.30	219.22
EEDI (gr CO <sub>2</sub> /(tn x nm))	<b>10.49</b>	<b>7.60</b>

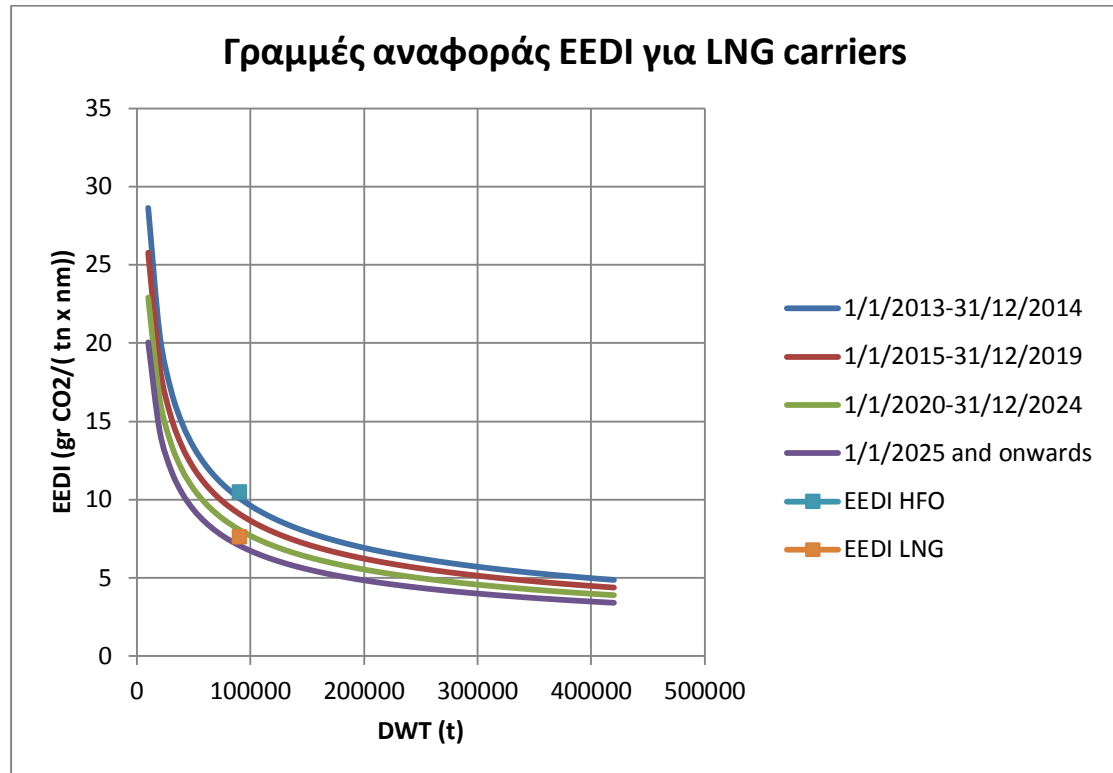
Πίνακας 6.1: Τιμή EEDI υπό μελέτη ατμοκίνητου πλοίου κατά IMO

Στον πίνακα 6.1 όπως είναι αναμενόμενο η τιμή του δείκτη EEDI είναι μεγαλύτερη για κατανάλωση HFO σε σύγκριση με αυτού του φυσικού αερίου. Επιπλέον, η τιμή που αντιστοιχεί στον όρο της ισχύος των γεννητριών λαμβάνει μηδενική τιμή. Έχει αναφερθεί προηγουμένως ότι οι γεννήτριες που κινούνται με ατμό δεν λαμβάνονται υπόψιν στην εκτίμηση του ενεργειακού δείκτη. Όσον αφορά την ντιζελογεννήτρια, η συμμετοχή της έχει αμεληθεί επειδή σύμφωνα με τον ηλεκτρολογικό ισολογισμό, οι ανάγκες του πλοίου μπορούν να ικανοποιηθούν από τις στροβιλογεννήτριες. Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζεται η τιμή του δείκτη EEDI διορθωμένη για την ύπαρξη γεννήτριας που καταναλώνει καύσιμο diesel.

Ship type	LNG-carrier with Steam propulsion	
DWT (t)	84776.5	
$V_S$ (kn)	19	
$P_{ME}$ (kW)	20299.5	
$P_{AE}$ (kW)	926.7	
SFC <sub>75% diesel generator</sub> (gr/kWh)	190	
$C_{F,diesel}$ (gr CO <sub>2</sub> /gr fuel)	3.206	
Fuel type	HFO	LNG
$C_F$ (gr CO <sub>2</sub> /gr fuel)	3.1144	2.75
SFC <sub>75%</sub> (gr/kWh)	267.30	219.22
EEDI (gr CO <sub>2</sub> /(tn x nm))	<b>10.84</b>	<b>7.95</b>

Πίνακας 6.2: Τιμή EEDI υπό μελέτη ατμοκίνητου πλοίου κατά IMO λαμβάνοντας υπόψιν και την ντιζελογεννήτρια

Στο διάγραμμα 6.1 συγκρίνονται οι τιμές του πίνακα 6.1 με τις γραμμές αναφοράς για πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου. Παρατίθεται όπως και στο κεφάλαιο 5 η επέκταση των γραμμών αυτών μέχρι το έτος 2025.



Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση ατμοκίνητου πλοίου με τα όρια αναφοράς (IMO)

Το υπό μελέτη πλοίο παραδόθηκε το 2007. Θεωρώντας τα 25 χρόνια ως προσδοκώμενο χρόνο ζωής για το υπό μελέτη πλοίο θα πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες ώστε να συμμορφωθεί με τους ισχύοντες κανονισμούς όταν αυτοί εφαρμοστούν.

### 6.3 Κατανάλωση καυσίμου

Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζεται η κατανάλωση του καυσίμου συναρτήσει του ποσοστού της μέγιστης ισχύος πρόωσης.

Fuel Consumption	100% NOR	75% NOR	50% NOR	25% NOR
HFO [t/day]	173.76	130.224	85.584	41.76
GAS [t/day]	142.56	106.8	71.28	35.184

Πίνακας 6.3: Ημερήσια κατανάλωση καυσίμου

Για το παρόν πλοίο δεν υπάρχουν δεδομένα για την κατανάλωση λιπαντικών. Για το λόγο αυτό θα θεωρηθεί ότι η κατανάλωση λαδιού είναι μειωμένη κατά 20% σε σύγκριση με το πλοίο για ηλεκτροπρόωση.

Στον πίνακα 6.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα:

<b>Κατανάλωση λιπαντικών</b>
82.8 tons/year

Πίνακας 6.4: Ετήσια κατανάλωση λιπαντικών

#### 6.4 Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα εξεταζόμενα μηχανήματα, η κατασκευάστρια εταιρία, τα ονομαστικά χαρακτηριστικά τους, το βάρος ανά μονάδα και το συνολικό βάρος. Στον πίνακα αυτό, παρουσιάζονται τα κύρια μηχανήματα που συντελούν στην πρόωση του πλοίου

Item	Maker-Type	Particulars	Number	Weight/unit (t)	Weight (t)
HP Turbine	KAWASAKI UA-400	36800kW	1	305	305
LP Turbine					
Boilers	MB-4E-NS2	61.5t/h	2	153	306
<b>Total (t)</b>			<b>611</b>		

Πίνακας 6.5 Προωστήρια μηχανήματα ατμοκίνητου πλοίου

Στον πίνακα 6.6 τα μηχανήματα αυτά δεν μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς τη συμμετοχή των υπόλοιπων μηχανημάτων που παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6. Αν και ο στρόβιλος, μαζί με τους λέβητες είναι κατεξοχήν τα βαρύτερα μηχανήματα της εν λόγω εγκατάστασης, το βάρος των υπολοίπων δεν είναι αμελητέο.

Item	Maker-Type	Particulars	Number	Weight/unit (t)	Weight (t)
Cargo pump	SHINKO	1850m <sup>3</sup> /h	8	1.93	15.41
Turbo generator	MITSUBISHI	3450kW-6600V	2	19.8	39.6
Economizer	-	-	2	31	62
Purifier DO	Westfalia OSE 40	2000l/h	1	0.3	0.3
Purifier L.O.	Westfalia OSE 20	2100l/h	2	0.2	0.4
Diesel generator	STX 8L32/40	3450kW-6600V	1	19.8	19.8
Control Air Compressor	Tamrotor Marine	350 m <sup>3</sup> /h x 8bar	2	0.73	1.46
Service Air Compressor	Tamrotor Marine	350 m <sup>3</sup> /h x 8bar	2	0.73	1.46
Main Air compressor	Sauer	120 m <sup>3</sup> /h x 30bar	2	0.44	0.88
Incinerator	Teamtec AS	1495kW x 1285700 kcal/h	1	4.45	4.45
Fresh Water Generators	Sasakura eng.	60t/day	2	2.50	5.00
Bilge Water Separator	Blohm+Voss/TMPB5	5m <sup>3</sup> /h	1	0.24	0.24
Sludge Pump	IMO AB	20m <sup>3</sup> /h	2	0.11	0.11
HFO Pump	IMO AB	50m <sup>3</sup> /h	3	0.24	0.71
MDO Pump	IMO AB	50m <sup>3</sup> /h	1	0.24	0.24
LO transfer Pump	IMO AB	10m <sup>3</sup> /h	1	0.24	0.24
Cargo Compressor	Cryostar	-	1	9.41	9.41
Nitrogen Generator System	Asap	165Nm <sup>3</sup> /h	1	0.79	0.79

Ballast pump	Shinko/RVP 500MS	3100m <sup>3</sup> /h	2	1	2
By-pass ballast pump	Shinko/RVP 500MS	1200m <sup>3</sup> /h	1	0.96	0.96
Bilge Fire & G/S pump	Shinko/RVP 160MS	240/150m <sup>3</sup> /h	2	0.4	0.8
Inert Gas System generator	Harmworth	286/343 m <sup>3</sup> /h at 50/60Hz	1	0.59	0.59
Aux Cooling SW pump	Shinko/SVA400MS	1500m <sup>3</sup> /h	2	0.65	1.29
Main SW Pump	Shinko/SVA300M	770m <sup>3</sup> /h	3	0.28	0.84
Main FW Cooling	Shinko/RVP100M	40m <sup>3</sup> /h	2	0.05	0.10
E/R Diesel Generator	STX engine	850kW at 1800rpm	1	12.4	12.4
E/R Bilge pump	IMO AB	10m <sup>3</sup> /h	1	0.24	0.24
E/R Fire pump	IMO AB	10m <sup>3</sup> /h	1	0.4	0.4
<b>Total(t)</b>			<b>182.1</b>		

Πίνακας 6.6: Προωστήρια μηχανήματα ατμοκίνητου πλοίου

## 6.5 Οικονομική μελέτη

Στην ενότητα αυτή όπως και στην αντίστοιχη ενότητα 5.6, θα πραγματοποιηθεί μελέτη της οικονομικής σκοπιμότητας για το υπό μελέτη πλοίο. Η μεθοδολογία παρουσιάζεται στο παράρτημα Β και στο παρόν σημείο θα παρατεθούν μόνο τα συγκεντρωτικά στοιχεία.

### 6.5.1 Βάρος άφορτου πλοίου

Χρησιμοποιώντας τις μεθόδους προσέγγισης του βάρους του χάλυβα για το υπό μελέτη πλοίο προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα 6.7

Βάρος μεταλλικής κατασκευής (t)	
Watson	19733
Murray	18607
Carreyette	19470
<b>Average</b>	<b>19270</b>

Πίνακας 6.7: Βάρος γάστρας μελετώμενου πλοίου

Το βάρος της ενδιαίτησης χωρίς τις μονώσεις τον δεξαμενών ανέρχεται σε :

$$(W_{OT})' = 2898t$$

Η ενίσχυση με Invar και plywood ανέρχεται αντιστοίχως σε **233.4t & 5454.6t**

### 6.5.2 Κόστος ανέγερσης πλοίου

Για το υπό μελέτη πλοίο ισχύει: (Οι τιμές της ενότητας 6.5 έχουν ληφθεί ίδιες με τις αντίστοιχες της ενότητας 5.6)

$$C_{ST_{mats}} = W_{ST} \cdot K_{ST} + 0.12 \cdot W_{ST} \cdot K_{ST} = 14,028,560\$$$

$$C_{ST_{work}} = \frac{0.7}{0.3} \cdot C_{ST_{mats}} = 32,733,306\$$$

Συνεπώς το κόστος μεταλλικής κατασκευής είναι: **46,761,866\$**

### 6.5.3 Κόστος ενδιαίτησης και εξοπλισμού

Το κόστος των εργατικών αποτελεί το 18% του συνολικού κόστους ενδιαίτησης και εξοπλισμού ενώ το υπόλοιπο αντιστοιχεί στο κόστος των υλικών.

Συνεπώς:

$$C_{OT,mat} = K_{OT} \cdot W_{OT}^{0,9} = 7,835,014\$$$

$$C_{INVAR} = K_{INVAR} \cdot W_{INVAR} = 3,034,200\$$$

$$C_{PLYWOOD} = K_{plywood} \cdot V_{plywood} = 3,272,460\$$$

$$C_{OT'MAT} = C_{OT,mat} + C_{INVAR} + C_{PLYWOOD} = 14,141,674\$$$

$$C_{OT,WORK} = \frac{0.18}{0.82} \cdot C_{OT'MAT} = 3,104,269\$$$

Οπότε το συνολικό κόστος ενδιαίτησης και εξοπλισμού είναι:

$$\mathbf{17,245,943\$}$$

### 6.5.4 Κόστος μηχανολογικού εξοπλισμού

Στον πίνακα 6.8 καταγράφονται τα μηχανήματα και οι τιμές τους. Ο πίνακας δεν αποτελεί πλήρη καταγραφή του μηχανολογικού εξοπλισμού, αλλά μόνο μία ενδεικτική απεικόνιση του κόστους των κυριότερων μηχανημάτων που συντελούν στην πρόωση.

Item	Price per unit (\$)	No. units	Price (\$)
Turbine and boilers	-	-	10943081
Turbo generators	426009	2	852016
Diesel generator	479289	1	479259
Steering gear	117000	1	117000

**Πίνακας 6.8:** Προωστήρια μηχανήματα ατμοκίνητου πλοίου

Συνεπώς:

$$C_{MATERIALS} = 12,391,356\$$$

$$C_{M,WORK} = \frac{0.15}{0.85} \cdot C_{M,MATERIALS} = 2,186,709\$$$

Οπότε το συνολικό κόστος της μηχανολογικής εγκατάστασης ανέρχεται σε:

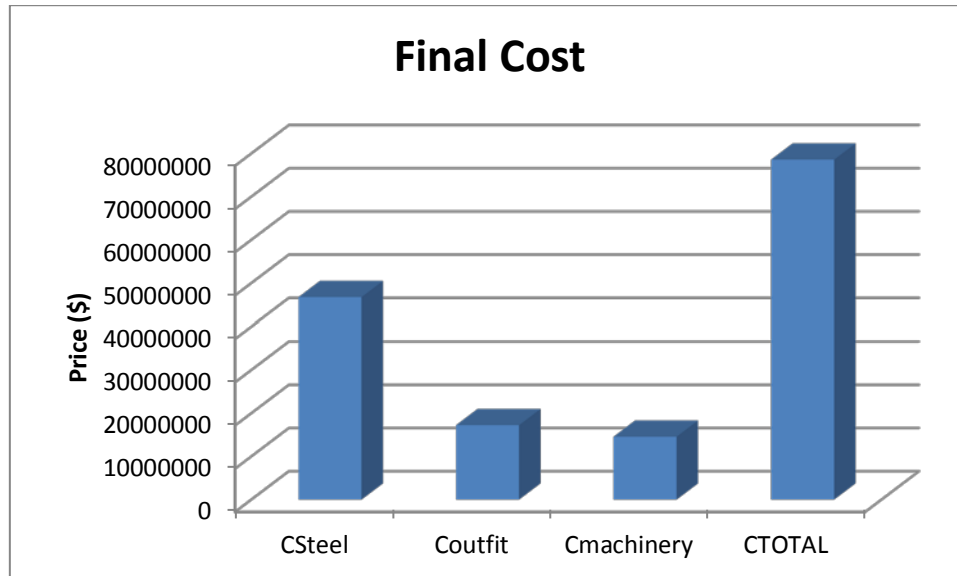
$$\mathbf{14,578,065\$}$$



Συνεπώς προκύπτει ο πίνακας 6.9 ο οποίος συνοψίζει το συνολικό κόστος ανέγερσης του ηλεκτροπροωθούμενου πλοίου:

Κόστος ανέγερσης πλοίου		
	Συνολικό κόστος (\$)	C <sub>i</sub> /C <sub>TOTAL</sub>
C <sub>ST</sub>	46,761,866	0.60
C <sub>OT</sub>	17,245,943	0.22
C <sub>M</sub>	14,578,065	0.18
C <sub>TOTAL</sub>	78,585,874	-

Πίνακας 6.9: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κόστους ανέγερσης ατμοκίνητου πλοίου



Διάγραμμα 6.2: Γραφική αναπαράσταση κόστους ανέγερσης πλοίου με ατμό

### 6.5.5 Λειτουργικά έξοδα πλοίου

Όπως και στο κεφάλαιο 5, υποθέτουμε ότι το πλοίο εκτελεί κυκλικά ταξίδια στην ίδια διαδρομή και ο χρόνος πλεύσης παραμένει σταθερός. Ο χρόνος εισόδου και εξόδου από το λιμάνι λόγω φόρτωσης/εκφόρτωσης είναι περίπου 20h. Ο χρόνος ελιγμών υποτίθεται γύρω στις 2h ανά λιμάνι, οπότε 4h ανά κύκλο ταξιδιού. Η ακτίνα λειτουργίας του πλοίου είναι 14500nm και η ταχύτητα πλεύσης 19kn.

Επομένως:

$$t_{trip} = 2 \cdot \frac{A \cdot R}{V_S} + t_{cargo_{load/unload}} + t_{maneuvering} = 1550h = 64.60days$$

Οι 15 ημέρες κατά τη διάρκεια του χρόνου αναλώνονται σε δεξαμενισμούς. Συνεπώς το πλοίο πραγματοποιεί περίπου  $N_{trip} = 5$  κυκλικά ταξίδια το χρόνο.

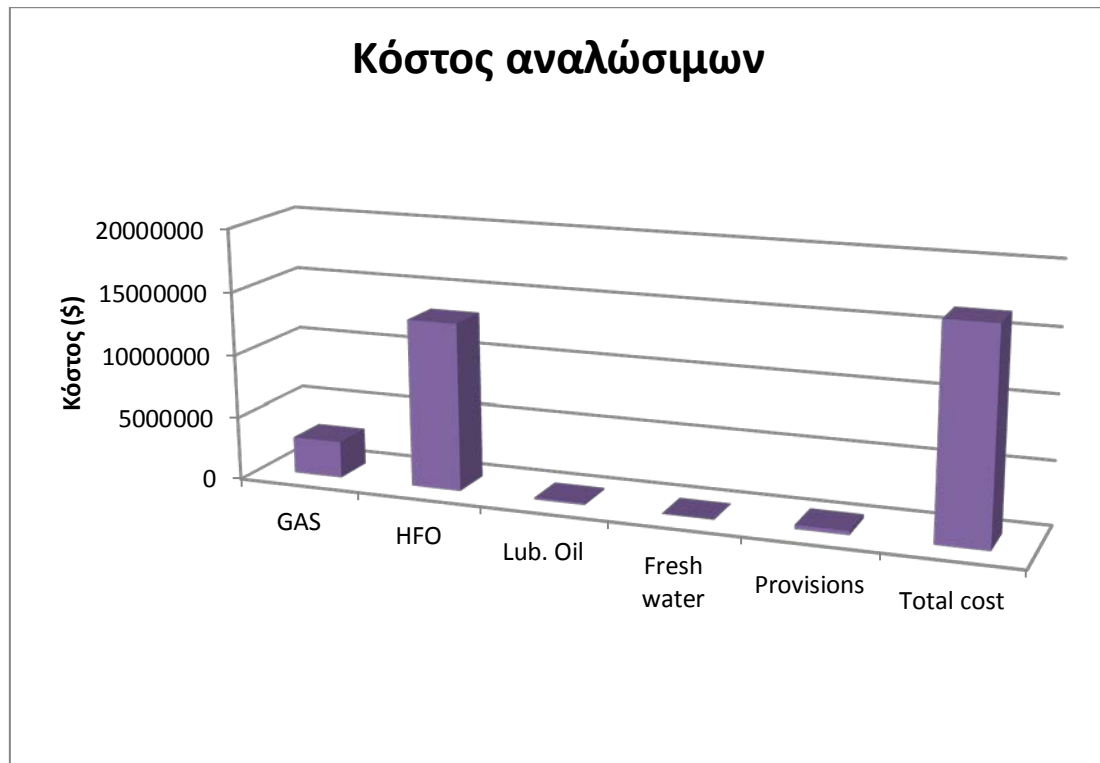
### Κόστος αναλώσιμων

Στο παρόν πλοίο επιτρέπεται να καεί ημερησίως λόγω φυσικού βρασμού το 0.15% του φορτίου. Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί σε 107tons. Θεωρώντας ότι το πλοίο κινείται με την

υπηρεσιακή του ταχύτητα, η κατανάλωση του φυσικού αερίου είναι 142.56t/day. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού της επιστροφής όπου δεν υπάρχει διαθέσιμο φορτίο να καταναλωθεί το Η.Φ.Ο. είναι το καταναλισκόμενο καύσιμο. Το καύσιμο που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των χειρισμών και φορτοεκφόρτωσης είναι το φυσικό αέριο. Η κατανάλωση πόσιμου νερού και φαγητού είναι όμοια με το πλοίο για ηλεκτροπρόωση. Στον πίνακα 6.10 παρουσιάζεται αναλυτικά το κόστος των αναλώσιμων.

Κόστος αναλώσιμων				
Είδος αναλώσιμου	Κατανάλωση ανά ταξίδι [t]	Κατανάλωση ανά έτος [t]	Τιμή [\$/t]	Ετήσιο κόστος [\$]
GAS	3402	17012	170	2,892,050
HFO	6881	34405	385	13,246,294
Lub oil	-	82.8	1540	127,512
Fresh water	420	4200	1	4,200
Provisions	-	-		310,464
<b>Total cost [\$]</b>				<b>16,580,520</b>

Πίνακας 6.10: Αναλυτικό κόστος αναλώσιμων



Διάγραμμα 6.3: Αναλυτικό κόστος αναλώσιμων

### 6.5.5.2 Υπόλοιπα λειτουργικά έξοδα

#### Κόστος μισθοδοσίας

Το μέσο κόστος μισθοδοσίας του πληρώματος (ελληνική σημαία) ανέρχεται στα 3000\$/ (άτομα x μήνα). Συνεπώς το κόστος των μισθών ανά έτος είναι :

$$C_{salary} = N_{crew} \cdot 3000 \cdot 12 = 1,620,000\$$$

#### Κόστος Λιμενικών Τελών

Το κόστος λιμενικών τελών ανά λιμάνι προσεγγίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$C_{PORT} = N_{TRIP} \cdot \left( 600 + 50 \cdot \left( L_{BP} \cdot B \cdot \frac{D}{10^5} \right) \right) = 67,524\$$$

με L,B,D σε [ft]

#### Κόστος Ασφάλισης

Το κόστος ασφάλισης προκύπτει:

$$C_{insurance} = 770 \cdot \left( N_{crew} + \frac{GT}{100} \right) = 785330\$$$

με GT=834895 κόροι.

#### Κόστος Συντήρησης

Το κόστος αυτής της κατηγορίας χωρίζεται στην ομάδα της συντήρησης της μεταλλικής κατασκευής και στην ομάδα της μηχανολογικής εγκατάστασης. Το ετήσιο κόστος της κατηγορίας προκύπτει:

$$C_{MAINTENANCE,ST} = 25000 \cdot \left( L_{BP} \cdot B \cdot \frac{D}{10^5} \right)^{\frac{2}{3}} = 588,873\$$$

$$C_{MAINTENANCE,MAC} = 5.44 \cdot P_B = 200,192\$$$

Συνεπώς το συνολικό κόστος συντήρησης ανέρχεται σε :

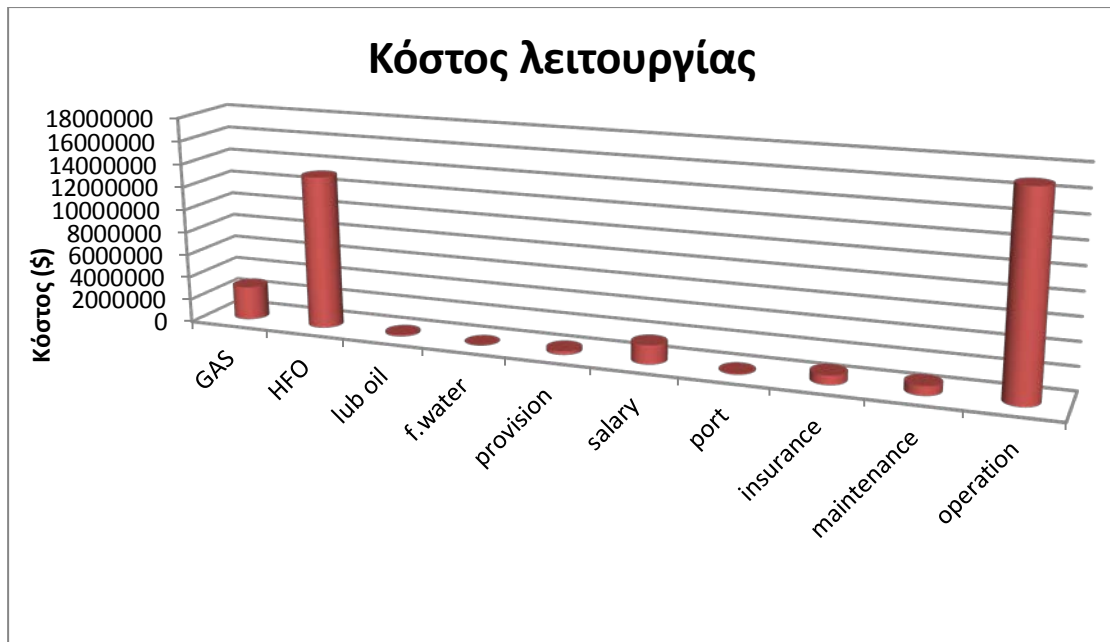
$$C_{MAINTENANCE} = 789,065\$$$

#### Συνολικό κόστος λειτουργίας

Το κόστος λειτουργίας προκύπτει σαν άθροισμα όλο των παραπάνω και είναι :

$$C_{OPERATION} = 16,950,389\$$$

Στο διάγραμμα 6.4 παρουσιάζονται τα λειτουργικά έξοδα του ατμοκίνητου πλοίου. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα, αφού τα έξοδα των καυσίμων (HFO-BOG) αποτελούν τις κυριότερες συνιστώσες του κόστους λειτουργίας.



Διάγραμμα 6.4: Κόστος λειτουργίας ατμοκίνητου πλοίου φυσικού αερίου

#### 6.5.6 Καθαρή παρούσα αξία- Ελάχιστος ναύλος

Τέλος, παρουσιάζεται στον πίνακα 6.11 ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και ο δείκτης επένδυσης για το υπό μελέτη πλοίο συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης. Στον πίνακα 6.12 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη σε περίπτωση που το καταναλισκόμενο φυσικό αέριο επιβαρύνει το ναυλωτή.

Ποσοστό δανειοδότησης	CAPEX [\$]	RFR [\$/t]
100%	8004145	63.11
90%	7203730	63.75
80%	6403316	64.39
70%	5602901	65.02
60%	4802487	65.66
50%	4002072	66.30
40%	3201658	66.93
30%	2401243	67.57
20%	1600829	68.21
10%	800414	68.85
0%	0	69.49

Πίνακας 6.11: Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο πρόωσης με ατμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΩΣΗΣ ΜΕ ΑΤΜΟ ΣΕ LNG CARRIER

Ποσοστό δανειοδότησης	CAPEX [\$]	RFR [\$/t]
100%	8004145	55.80
90%	7203730	56.43
80%	6403316	57.07
70%	5602901	57.70
60%	4802487	58.34
50%	4002072	58.98
40%	3201658	59.62
30%	2401243	60.25
20%	1600829	60.89
10%	800414	61.52
0%	0	62.16

**Πίνακας 6.12:** Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο πρόωσης με ατμό υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος του φυσικού αερίου επιβαρύνει τον ναυλωτή

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

### 7.1 Ανασκόπηση διπλωματικής

Αρχικά, η παρούσα διπλωματική περιλαμβάνει αναφορές στους κανονισμούς και στη γενικότερη περιβαλλοντική πολιτική του IMO για τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων. Γίνονται πολύ σημαντικές προσπάθειες για τη μείωση της συνεισφοράς των πλοίων στην παγκόσμια ρύπανση. Θεσπίζονται αυστηρότεροι κανονισμοί, καθορίζονται συνεχώς περιοχές περιορισμού των εκπεμπόμενων ρύπων και απαιτούνται φιλικότερα προς το περιβάλλον καύσιμα (φυσικό αέριο) για χρήση. Η εισαγωγή δεικτών ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI-EEOI) για τις διάφορες καταστάσεις πλεύσης κρίνεται σημαντικό βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση.

Στη συνέχεια, γίνεται λόγος για τα κυριότερα συστήματα πρόωσης που κυριαρχούν σήμερα στην μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου μέσω πλοίων. Από τη μία πλευρά, αναλύεται η ηλεκτροπρόωση, τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά της, οι περιοχές εφαρμογής της και οι βασικές αρχές λειτουργίας της. Από την άλλη, γίνεται καταγραφή των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων του συστήματος πρόωσης με ατμό, και παρατίθενται τα βασικά στοιχεία που αποτελούν την μηχανολογική εγκατάσταση ενός ατμοκίνητου πλοίου.

Ο υπολογισμός των δεικτών EEDI για τα δύο υπό μελέτη πλοία είναι το επόμενο θέμα της παρούσας διπλωματικής. Παρουσιάζονται αναλυτικά οι καταναλώσεις καυσίμου και λιπαντικών, το βάρος και τα μηχανήματα του κάθε συστήματος πρόωσης ενώ στο τέλος πραγματοποιείται και οικονομική μελέτη για το κάθε μηχανολογικό σύστημα. Επιπρόσθετα, για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση, υπολογίζεται ο ενεργειακός δείκτης EEOI, το βάρος των καλωδιώσεων ενώ προτείνεται και μία εναλλακτική προσέγγιση του δείκτη EEDI.

### 7.2 Σύγκριση-Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των κεφαλαίων 5 και 6.

#### 7.2.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα

Στον πίνακα 7.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών του δείκτη EEDI για το ηλεκτροκίνητο και το ατμοκίνητο πλοίο.

	Ηλεκτροκίνητο πλοίο		Ατμοκίνητο πλοίο	
	HFO	LNG	HFO	LNG
<b>EEDI<sub>IMO</sub></b>	7.17	5.19	10.49	7.60
<b>EEDI<sub>CTMI</sub></b>	10.49	7.60	-	-
<b>Όρια αναφοράς EEDI</b>				
1/1/2015-31/12/2019	1/1/2020-31/12/2024		1/1/2025 και έπειτα	
<b>9.08</b>	<b>8.08</b>		<b>7.06</b>	

**Πίνακας 7.1:** Σύγκριση τιμών EEDI για το ατμοκίνητο και το ηλεκτροκίνητο πλοίο

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στον πίνακα 7.1 είναι φανερή η ανάγκη για τον ακριβή ορισμό του δείκτη EEDI για τα ηλεκτροκίνητα πλοία. Σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς του IMO, οι τιμές του πλοίου με ηλεκτροπρόωση είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές του ατμοκίνητου πλοίου. Μάλιστα, οι τιμές αυτές για κατανάλωση καυσίμου LNG είναι συμβατές και με τις απαιτήσεις για μείωση ρύπων μέχρι το 2025. Από την άλλη πλευρά, η πρόταση του CTMI για τον υπολογισμό του εν λόγω δείκτη ανατρέπει τα ισχύοντα δεδομένα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία όπως έχει αναφερθεί, επικεντρώνεται στην συνολική ηλεκτρική εγκατεστημένη ισχύ και για το λόγο αυτό παρουσιάζει αποτελέσματα μεγαλύτερα από αυτά του IMO. Μάλιστα, τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής, συμπίπτουν με αυτά του ατμοκίνητου πλοίου. Τέλος, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι τα μελετώμενα πλοία, παρουσιάζουν διαφορά στην υπηρεσιακή ταχύτητα της τάξης του 1kn και διαφορά εκτοπίσματος περίπου 5550t.

### 7.2.2 Κατανάλωση καυσίμων και λιπαντικών

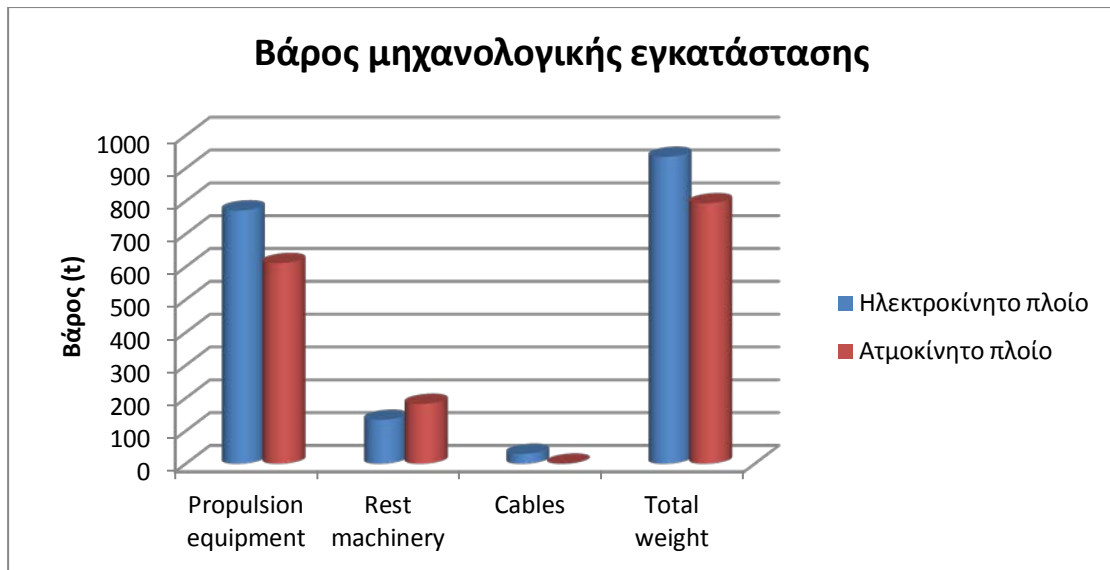
Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζεται η κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών για τα δύο πλοία. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για το ηλεκτροκίνητο πλοίο ήταν σαφώς αναλυτικότερη λόγω της πληθώρας δεδομένων που ήταν διαθέσιμα. Για το ατμοκίνητο πλοίο οι καταναλώσεις ελήφθησαν από το εγχειρίδιο λειτουργίας του πλοίου. Όπως ήταν αναμενόμενο οι καταναλώσεις για την ικανοποίηση της λειτουργίας και της πρόωσης του ηλεκτροκίνητου πλοίου είναι σαφώς μικρότερες από αυτές του ατμοκίνητου.

	Ηλεκτροκίνητο πλοίο	Ατμοκίνητο πλοίο
<b>Seagoing HFO Laden [t/day]</b>	147.6	173.76
<b>Seagoing GAS Laden [t/day]</b>	112.4	142.56
<b>Lub. oil [t/year]</b>	103.5	82.8

Πίνακας 7.2: Κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών

### 7.2.3 Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης

Στον πίνακα 7.3 και στο διάγραμμα 7.1 φαίνονται συγκεντρωτικά τα βάρη των δύο μηχανολογικών εγκαταστάσεων. Παρατηρείται ότι ελαφρύτερο είναι το ατμοκίνητο πλοίο, αλλά η διαφορά αυτή είναι αμελητέα ως προς τη μεταφορική ικανότητα των πλοίων. Τυχόν σφάλματα στην προσέγγιση του βάρους μπορεί να οφείλονται στον αριθμό των μηχανημάτων που ελήφθησαν υπόψιν για τα δύο συστήματα πρόωσης.



Διάγραμμα 7.1: Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης μελετώμενων πλοίων

	Ηλεκτροκίνητο πλοίο	Ατμοκίνητο πλοίο
<b>Propulsion equipment</b>	771.4	611
<b>Rest machinery</b>	133.4	182.1
<b>Cables</b>	29.9	0
<b>Total weight</b>	934.7	793.1

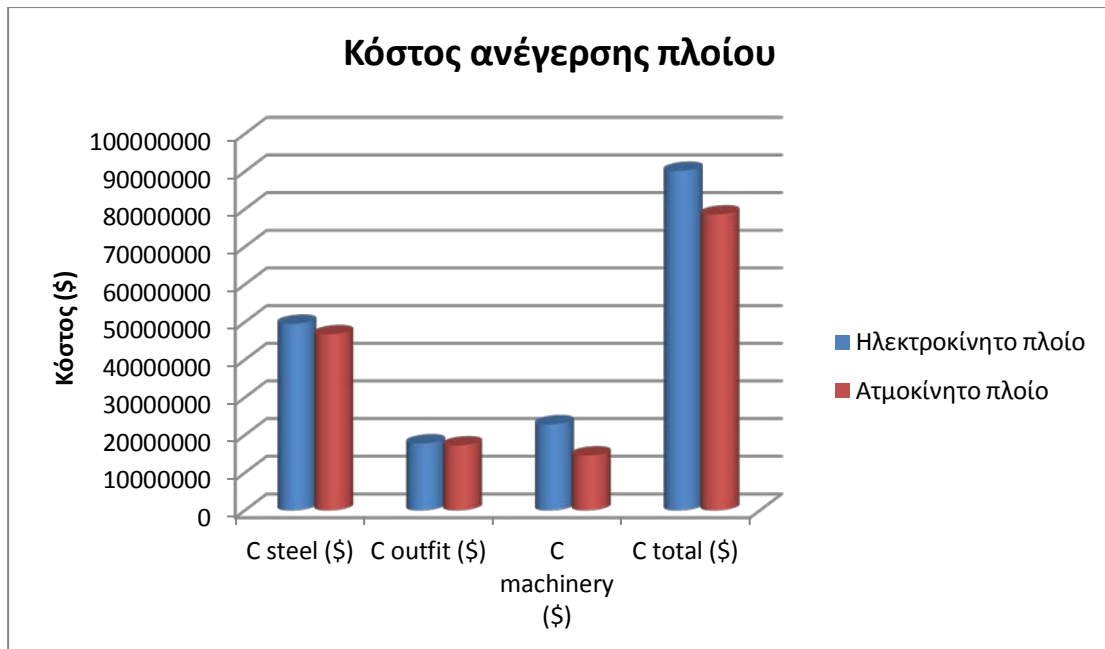
Πίνακας 7.3: Σύγκριση βάρους μηχανολογικού εξοπλισμού

Τα αποτελέσματα της παραγράφου αυτής ήταν αναμενόμενα. Αφενός ο εξοπλισμός είναι βαρύτερος για συστήματα ηλεκτροπρόωσης και αφετέρου πρόκειται για πλοίο μεγαλύτερων διαστάσεων και ταχύτητας.

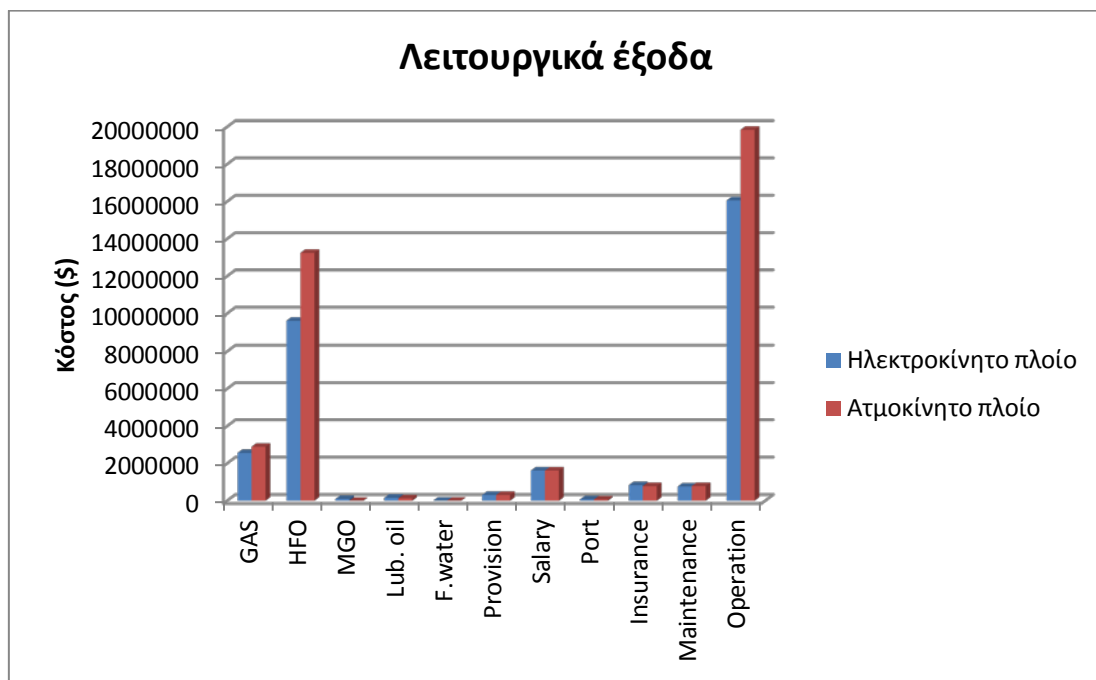
#### 7.2.4 Οικονομική σύγκριση

Στην ενότητα αυτή συγκρίνονται τα κόστη ανέγερσης & λειτουργίας των δύο σκαφών καθώς και ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος. Το κόστος ανέγερσης, το οποίο αφορά αποκλειστικά το μέγεθος του πλοίου είναι μεγαλύτερο για το ηλεκτροκίνητο πλοίο. Το κόστος της μηχανολογικής εγκατάστασης για το ηλεκτροκίνητο πλοίο είναι μεγαλύτερο από το ατμοκίνητο. Αν και το αποτέλεσμα είναι και εδώ αναμενόμενο, η διαφορά κόστους είναι από αμφισβήτηση. Σε περίπτωση που υπήρχαν αναλυτικότερα δεδομένα για τον πλήρη μηχανολογικό εξοπλισμό των δύο εγκαταστάσεων θα μπορούσε να είχε προσεγγιστεί υπό καλύτερες προϋποθέσεις το κόστος αγοράς των μηχανημάτων. Στα διαγράμματα 7.2, 7.3 παρουσιάζεται το κόστος ανέγερσης και λειτουργίας για το κάθε πλοίο. Στον πίνακα 7.4 παρουσιάζεται ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος υπό την μελέτη που προηγήθηκε και στον πίνακα 7.5 υπό το σενάριο να επιβαρύνεται ο ναυλωτής για το καταναλισκόμενο φυσικό αέριο που εξατμίζεται με φυσικό τρόπο.





Διάγραμμα 7.2: Κόστος ανέγερσης πλοίων



Διάγραμμα 7.3: Κόστος λειτουργίας πλοίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο : ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ  
ΕΡΕΥΝΑ

Ποσοστό δανειοδότησης	Ηλεκτροκίνητο πλοίο		Ατμοκίνητο πλοίο	
	CAPEX [\$]	RFR [\$/t]	CAPEX[\$]	RFR[\$/t]
100%	9181273	58.21	8004145	63.11
90%	8263145	58.89	7203730	63.75
80%	7345018	59.55	6403316	64.39
70%	6426891	60.22	5602901	65.02
60%	5508764	60.89	4802487	65.66
50%	4590636	61.55	4002072	66.30
40%	3672509	62.21	3201658	66.93
30%	2754382	62.88	2401243	67.57
20%	1836255	63.55	1600829	68.21
10%	918127	64.22	800414	68.85
0%	0	64.89	0	69.49

**Πίνακας 7.4:** Κόστος επένδυσης και ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος

Ποσοστό δανειοδότησης	Ηλεκτροκίνητο πλοίο		Ατμοκίνητο πλοίο	
	CAPEX [\$]	RFR [\$/t]	CAPEX[\$]	RFR[\$/t]
100%	9181273	52.30	8004145	55.80
90%	8263145	52.97	7203730	56.43
80%	7345018	53.63	6403316	57.07
70%	6426891	54.30	5602901	57.70
60%	5508764	54.97	4802487	58.34
50%	4590636	55.63	4002072	58.98
40%	3672509	56.30	3201658	59.62
30%	2754382	56.97	2401243	60.25
20%	1836255	57.64	1600829	60.89
10%	918127	58.31	800414	61.52
0%	0	58.93	0	62.16

**Πίνακας 7.5:** Κόστος επένδυσης και ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος με το κόστος του καταναλισκόμενου φυσικού αερίου να επιβαρύνει τον ναυλωτή.

Οι διαφορές στον ελάχιστο απαιτούμενο ναύλο για τα δύο πλοία οφείλονται:

- Διαφορετικό κόστος ανέγερσης
- Διαφορετικά λειτουργικά έξοδα
- Διαφορετική μεταφορική ικανότητα

### 7.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

- Δημιουργία δεικτών λειτουργίας ενεργειακής αποδοτικότητας για καταστάσεις όπου δεν υφίσταται η έννοια του μεταφορικού έργου, δηλαδή για καταστάσεις ελιγμών ή καταστάσεις διαχείρισης φορτίου
- Τεχνοοικονομική σύγκριση εγκατάστασης που χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα με εγκατάσταση λειτουργίας σε συνεχές ρεύμα σε πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου
- Μελέτη για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του άκαυστου μεθανίου σε πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Ιωαννίδης Ι.Π., Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ., «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου-Συμπληρωματικά Βοηθήματα και Ασκήσεις». Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2010.
2. Φραγκόπουλος Χ.Α., Προυσαλίδης Ι.Μ., «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου - Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις, Εισαγωγή στον αυτοματισμό», Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2005
3. Ιωαννίδης Ι.Π., «Ναυτικές Μηχανές», Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 1999
4. Φραγκόπουλος Χ.Α., Παπαδόπουλος Χ.Ι., «Μέθοδος προμελέτης ναυτικών συστημάτων με κινητήρες diesel», Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2008
5. Φραγκόπουλος Χ.Α., «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου», Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2009
6. Παπανικολάου Α.Δ. «Μελέτη Πλοίου, Μεθοδολογίες Προμελέτης», Αθήνα 2009
7. Πολίτης Γ.Κ., «Σημειώσεις μαθήματος: Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου», Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2008
8. Κουτσούρης Θ., Διπλωματική: «Διερεύνηση δεικτών ενεργειακής απόδοσης σε πλοία με ηλεκτροπρόωση», Αθήνα 2013
9. Σταυρόπουλος Ι.Α., Διπλωματική: : «Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροπρόωσης πλοίου», Αθήνα 2014
10. Σκαβάρας Π., Μεταπτυχιακή εργασία: «Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίου Μεταφοράς Υγροποιημένου Αερίου – LNG Carrier», Αθήνα 2013
11. Ανδριανός Κ., Thesis: «Techno-economic Evaluation of Various Energy Systems for LNG Carriers», Αθήνα 2006
12. Χατζηλάου Ι.Κ., Προυσαλίδης Ι.Μ., Αντωνόπουλος Γ, Γύπαρης Ι.Κ., Βαλλιανάτος Π., : «Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο», Αθήνα 2006
13. Σοφράς Ε.Δ., Διδακτορική διατριβή: «Contribution to the Development of a Design Methodology of a Power System of a Ship with Electric Propulsion, with Emphasis on the Investigation of Related Power Supply Quality Problems », Αθήνα 2014
14. «Οδηγίες Χρήσεως Μεθοδικών Σειρών Β.Σ.Ρ.Α. για τον Υπολογισμό της Αντιστάσεως Προώσεως » Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2012
15. «Μέθοδος FORMDATA για τον Υπολογισμό της Αντιστάσεως Προώσεως » Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2012
16. «Υπολογισμός Αντιστάσεως με τη Μέθοδο LAP/KELLER » Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Σχ. Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών, Αθήνα 2012
17. MEPC.1/Circular 681 «Interim Guidelines on the Method of Calculation of the Energy Efficiency Design Index for New Ships», Αθήνα 2009
18. Yoshifumi Ajioka, Kiyoshi Ohno, «Electric Propulsion Systems for Ships»

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

19. Arrington J.W. «The Analysis of Components, Designs, and Operation for Electric Propulsion and Intergrated Electrical System», Naval Postgraduate School, California 1998
20. Laugen L. «An Environmental Life Cycle Assessment of LNG and HFO as Marine Fuels», NTNU, Trondheim 2013
21. DNV Managing Risk, «Assessment of measures to reduce future CO<sub>2</sub> emissions from shipping », Research and Innovation, 2010

### Διαδίκτυο

1. [www.imo.gr](http://www.imo.gr)
2. [www.wartzila.com](http://www.wartzila.com)
3. [www.manbw.com](http://www.manbw.com)
4. [www.crystec.com](http://www.crystec.com)
5. [www.chemeng.ntua.gr/courses](http://www.chemeng.ntua.gr/courses)
6. [www.shipbuildinghistory.com](http://www.shipbuildinghistory.com)
7. [web.mit.edu](http://web.mit.edu)
8. [www.daedalus.gr](http://www.daedalus.gr)
9. [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)
10. [www.bunkerworld.com](http://www.bunkerworld.com)

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ**

ITEM	SET	OUTPUT [kW]	VOLTAGE [V]	25% I <sub>y</sub> (A)	I (standar) (A)	Nominal Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Cable's Length (m)	Cable's specific weight (kg/m)	Cable's weight per consumer (kg)	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
<b>PROPULSION PLANT</b>											
Electric Propulsion Motor	2	13260.00	6600.00	1751.35	1866.00	6x(3x185)	37.55	32.58	1223.38	75.10	2446.76
Propulsion motor cooling fan	4	13.20	440.00	28.56	30.00	3x6	37.55	0.54	20.28	150.20	81.11
Propulsion motor excitation power	2		440.00	113.85	140.00	3x70	37.55	3.70	138.94	75.10	277.87
Propulsion transformer cooling fan	8	1.80	440.00	4.25	6.00	3x1.5	20.37	0.27	5.50	162.96	44.00
Lub. Pump for motor lub unit	4	1.30	440.00	3.09	6.00	3x1.5	37.55	0.27	10.14	150.20	40.55
<b>TOTAL</b>										<b>613.56</b>	<b>2890.29</b>
<b>GENERATING PLANT</b>											
Main GE JW preheating pump	2	1.10	440.00	2.70	3.00	3x1.5	45.31	0.27	12.23	90.62	24.47
Main GE FO supply pump (for 9L)	8	1.50	440.00	3.67	6.00	3x1.5	45.31	0.27	12.23	362.48	97.87
Main GE FO circ. Pump (for 9L)	8	3.70	440.00	8.30	10.00	3x1.5	45.31	0.27	12.23	362.48	97.87
Main GE pilot oil supply pump	4	2.50	440.00	5.79	6.00	3x1.5	48.89	0.27	13.20	195.56	52.80
Main GE pre-LO pump (for 9L)	4	12.70	440.00	27.59	30.00	3x6	52.09	0.54	28.13	208.36	112.51
<b>TOTAL</b>										<b>1219.50</b>	<b>385.52</b>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ

ITEM	SET	OUTPUT [kW]	VOLTAGE [V]	25% I <sub>y</sub> (A)	I (standar) (A)	Nominal Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Cable's Length (m)	Cable's specific weight (kg/m)	Cable's weight per consumer (kg)	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
<b>WATER HANDLING EQUIPMENT</b>											
Main cool. SW pump	3	75.00	440.00	157.27	203.00	3x120	31.08	4.08	126.81	93.24	380.42
Aux cool. SW pump	2	150.00	440.00	309.32	315.00	3x(3x50)	25.41	2.70	68.61	50.82	137.21
Aux cool. FW pump	2	132.00	440.00	274.20	315.00	3x(3x50)	45.39	2.70	122.55	90.78	245.11
Cargo machinery CFW booster pump	2	37.00	440.00	79.31	140.00	3x70	45.39	3.70	167.94	90.78	335.89
FW generator distillate pump	2	1.30	440.00	3.09	6.00	3x1.5	49.14	0.27	13.27	98.28	26.54
FW generator ejector pump	2	11.00	440.00	24.12	30.00	3x6	27.43	0.54	14.81	54.86	29.62
<b>TOTAL</b>										<b>478.76</b>	<b>1154.79</b>
<b>OIL HANDLING EQUIPMENT</b>											
HFO purifier	3	17.50	440.00	38.01	41.00	3x10	45.74	0.79	36.13	137.22	108.40
HFO purifier feed pump	3	3.50	440.00	7.91	10.00	3x1.5	45.74	0.27	12.35	137.22	37.05
HFO transfer pump	1	17.00	440.00	36.47	41.00	3x10	27.43	0.79	21.67	27.43	21.67
MDO transfer pump	1	17.00	440.00	36.47	41.00	3x10	29.93	0.79	23.64	29.93	23.64
Main GE LO purifier	4	8.60	440.00	18.91	21.00	3x4	38.60	0.44	16.98	154.40	67.94
Main GE lo purifier feed pump	4	2.50	440.00	5.79	6.00	3x1.5	38.60	0.27	10.42	154.40	41.69
Stern tube LC pump	2	1.30	440.00	3.09	6.00	3x1.5	38.60	0.27	10.42	77.20	20.84
LO transfer pump	1	3.50	440.00	8.10	10.00	3x1.5	29.41	0.27	7.94	29.41	7.94
Incinerator MDO supply pump	2	3.70	440.00	8.30	10.00	3x1.5	29.93	0.27	8.08	59.86	16.16
<b>TOTAL</b>										<b>807.07</b>	<b>345.34</b>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ

ITEM	SET	OUTPUT [kW]	VOLTAGE [V]	25% I <sub>y</sub> (A)	I (standar) (A)	Nominal Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Cable's Length (m)	Cable's specific weight (kg/m)	Cable's weight per consumer (kg)	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
<b>BOILER PLANT</b>											
Aux boiler FO fan	2	17.50	440.00	38.01	41.00	3x10	39.58	0.79	31.27	79.16	62.54
Aux boiler FO pump	2	4.80	440.00	10.81	21.00	3x4	39.58	0.44	17.42	79.16	34.83
Aux boiler feed Water Pump	2	22.00	440.00	47.66	50.00	3x16	39.58	1.09	43.14	79.16	86.28
Boiler Water circ. Pump	4	5.50	440.00	12.35	21.00	3x4	57.57	0.44	25.33	230.28	101.32
Boiler chemical feed pump	2	0.40	440.00	1.16	2.00	3x1.5	57.57	0.27	15.54	115.14	31.09
<b>TOTAL</b>										<b>582.90</b>	<b>316.06</b>
<b>OTHER EQUIPMENT IN MACHINERY SPACE</b>											
Main air compressor	2	27.50	440.00	59.05	105.00	3x50	22.60	2.70	61.02	45.20	122.04
Control/Service air compressor	4	42.00	440.00	89.15	105.00	3x50	55.54	2.70	149.96	222.16	599.83
Engine room fan	4	55.00	440.00	116.55	140.00	3x70	15.10	3.70	55.87	60.40	223.48
Purifier room exhaust fan	1	15.00	440.00	32.61	41.00	3x10	64.86	0.79	51.24	64.86	51.24
Welding Area exhaust fan	1	0.80	440.00	2.12	3.00	3x1.5	30.75	0.27	8.30	30.75	8.30
MGPS	1		440.00	0.77	2.00	3x1.5	20.34	0.27	5.49	20.34	5.49
Sludge pump	1	6.30	440.00	13.70	21.00	3x4	36.53	0.44	16.07	36.53	16.07
Bilge Water transfer pump	1	2.60	440.00	5.98	6.00	3x1.5	36.37	0.27	9.82	36.37	9.82
Clean drain pump (E/R bilge pump)	1	2.20	440.00	5.21	6.00	3x1.5	39.60	0.27	10.69	39.60	10.69
Incinerator FO fan etc	1	28.00	440.00	60.01	105.00	3x50	52.43	2.70	141.56	52.43	141.56
Extraction fan for MG	4	3.70	440.00	8.30	10.00	3x1.5	50.00	0.27	13.50	200.00	54.00
Extraction fan for GCU	2	2.20	440.00	5.21	6.00	3x1.5	50.00	0.27	13.50	100.00	27.00
<b>TOTAL</b>										<b>908.64</b>	<b>1269.53</b>



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ

ITEM	S E T	OUTPUT [kW]	VOLTAGE [V]	25% I <sub>y</sub> (A)	I (standa r) (A)	Nominal Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Cable's Length (m)	Cable's specific weight (kg/m)	Cable's weight per consumer (kg)	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
<b>CARGO HANDLING EQUIPMENT</b>											
Electric cargo pump	8	610.00	6600.00	81.74	105.00	3x50	32.09	2.70	86.64	256.72	693.14
Cargo stripping/spray pump	4	30.00	440.00	64.26	105.00	3x50	32.09	2.70	86.64	128.36	346.57
Hydro power pack	2	34.00	440.00	72.94	105.00	3x50	32.09	2.70	86.64	64.18	173.29
Em'cy cargo pump	1	200.00	6600.00	27.38	31.00	3x6	42.09	0.54	22.73	42.09	22.73
High duty compressor	2	1000.00	6600.00	134.70	140.00	3x70	41.30	3.70	152.81	82.60	305.62
High duty aux. LO pump	2	2.60	440.00	5.79	6.00	3x1.5	41.30	0.27	11.15	82.60	22.30
Low duty compressor	2	900.00	6600.00	121.23	140.00	3x70	41.30	3.70	152.81	82.60	305.62
Low duty aux. LO pump	2	6.60	440.00	14.67	21.00	3x4	41.30	0.44	18.17	82.60	36.34
Fuel gas pump	2	12.00	440.00	26.05	30.00	3x6	23.80	0.54	12.85	47.60	25.70
Glycol water circ. Pump	2	7.50	440.00	13.28	21.00	3x4	24.90	0.44	10.96	49.80	21.91
Glycol water heater	1		440.00	108.06	140.00	3x70	24.90	3.70	92.13	24.90	92.13
Vacuum pump	2	37.00	440.00	79.31	105.00	3x50	54.60	2.70	147.42	109.20	294.84
IG plant blower	4	125.00	440.00	253.17	315.00	3x(3x50)	60.00	8.10	486.00	240.00	1944.00
IG plant refrigerant compressor	1	290.00	440.00	589.12	610.00	3x(3x120)	60.00	12.24	734.40	60.00	734.40
IG plant dryer fan	1	63.00	440.00	132.18	140.00	3x70	60.00	3.70	222.00	60.00	222.00
IG plant dryer heater	1		440.00	656.08	816.00	3x(3x150)	60.00	14.79	887.40	60.00	887.40
IG plant FO pump	2	6.40	440.00	14.28	21.00	3x4	60.00	0.44	26.40	120.00	52.80
Nitrogen generator	2	85.00	440.00	176.37	203.00	3x120	60.00	4.08	244.80	120.00	489.60
GCU combutor air fan	2	160.00	440.00	328.43	420.00	3x(3x70)	30.80	11.10	341.88	61.60	683.76
GCU dilution air fan	3	170.00	440.00	349.07	420.00	3x(3x70)	30.80	11.10	341.88	92.40	1025.64
<b>TOTAL</b>										<b>2070.45</b>	<b>8434.67</b>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ

ITEM	SET	OUTPUT [kW]	VOLTAGE [V]	25% I <sub>y</sub> (A)	I (standar) (A)	Nominal Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Cable's Length (m)	Cable's specific weight (kg/m)	Cable's weight per consumer (kg)	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
<b>SHIP SYSTEM</b>											
Ballast pump	3	355.00	440.00	721.11	816.00	3x(3x150)	21.05	14.79	311.33	63.15	933.99
Valve control hydro p/pack pump	2	8.60	440.00	18.91	21.00	3x4	21.05	0.44	9.26	42.10	18.52
FWD HFO transfer pump	2	17.00	440.00	36.47	41.00	3x10	32.09	0.79	25.35	64.18	50.70
Bilge, fire & GS pump	2	90.00	440.00	186.79	203.00	3x120	28.37	4.08	115.75	56.74	231.50
Fire Pump	1	75.00	440.00	157.27	203.00	3x120	31.05	4.08	126.68	31.05	126.68
Em'cy fire pump	1	55.00	440.00	116.55	140.00	3x70	30.06	3.70	111.22	30.06	111.22
Water spray pump	1	355.00	440.00	721.11	816.00	3x(3x150)	25.10	14.79	371.23	25.10	371.23
Jockey pump	1	11.00	440.00	24.12	31.00	3x6	32.79	0.54	17.71	32.79	17.71
<b>TOTAL</b>										<b>345.17</b>	<b>1861.56</b>
<b>MANOEUVRING EQUIPMENT</b>											
Steering gear motor	2	110.00	440.00	228.28	315.00	3x(3x50)	49.30	8.10	399.33	98.60	798.66
Bow thruster	1	2200.00	6600.00	296.36	315.00	3x(3x50)	239.00	8.10	1935.90	239.00	1935.90
Thruster hydro oil pump	1	5.50	440.00	12.35	21.00	3x4	239.00	0.44	105.16	239.00	105.16
Bow thruster/FWD pump room fan	1	5.50	440.00	12.35	21.00	3x4	239.00	0.44	105.16	239.00	105.16
<b>TOTAL</b>										<b>1193.56</b>	<b>2944.88</b>
<b>DECK MACHINERY</b>											
Deck machinery hydr. p/pack fore	4	132.00	440.00	268.03	315.00	3x(3x50)	224.00	8.10	1814.40	896.00	7257.60
Deck machinery hydr. p/pack aft	2	132.00	440.00	268.03	315.00	3x(3x50)	54.00	8.10	437.40	108.00	874.80
<b>TOTAL</b>										<b>1004.00</b>	<b>8132.40</b>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ

ITEM	SET	OUTPUT [kW]	VOLTAGE [V]	25% I <sub>y</sub> (A)	I (standar) (A)	Nominal Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Cable's Length (m)	Cable's specific weight (kg/m)	Cable's weight per consumer (kg)	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
<b>AIR COND. &amp; VENTILATION EQUIPMENT</b>											
Steering gear room fan	1	5.50	440.00	12.35	21.00	3x4	49.30	0.44	21.69	49.30	21.69
Bosun store fan	1	7.50	440.00	16.59	21.00	3x4	215.00	0.44	94.60	215.00	94.60
Pipe duct fan	1	11.00	440.00	24.12	30.00	3x6	52.00	0.54	28.08	52.00	28.08
Side passage fan	2	15.00	440.00	32.61	41.00	3x10	24.08	0.79	19.02	48.16	38.05
Hospital fan	1	0.30	440.00	0.77	2.00	3x1.5	24.08	0.27	6.50	24.08	6.50
Cargo compressor room fan	2	30.00	440.00	64.26	105.00	3x50	41.00	2.70	110.70	82.00	221.40
Electric motor room fan	2	5.50	440.00	12.35	21.00	3x4	42.00	0.44	18.48	84.00	36.96
Accom. A/Cond. Compressor	2	180.00	440.00	369.53	420.00	3x(3x70)	26.00	11.10	288.60	52.00	577.20
Accom. A/Cond. Fan	2	42.60	440.00	90.31	105.00	3x50	26.00	2.70	70.20	52.00	140.40
ER A/Cond. Compressor	2	127.00	440.00	263.59	305.00	3x(3x50)	26.80	8.10	217.08	53.60	434.16
Fan unit for ECR	1	0.50	440.00	1.35	2.00	3x1.5	23.00	0.27	6.21	23.00	6.21
Fan unit for ER workshop	1	3.70	440.00	8.30	10.00	3x1.5	23.00	0.27	6.21	23.00	6.21
Fan unit for MSB room	2	7.50	440.00	16.59	21.00	3x4	23.00	0.44	10.12	46.00	20.24
Fan unit for CSB room	4	0.30	440.00	0.77	2.00	3x1.5	23.00	0.27	6.21	92.00	24.84
Fan unit for converter room	2	2.20	440.00	5.21	6.00	3x1.5	23.00	0.27	6.21	46.00	12.42
Drying room heater	1		440.00	5.79	6.00	3x1.5	37.70	0.27	10.18	37.70	10.18
Galley pack. A/Cond. Heater	1		440.00	57.89	105.00	3x50	30.05	2.70	81.14	30.05	81.14
Galley pack. A/Cond. Fan	1	1.50	440.00	3.67	6.00	3x1.5	30.05	0.27	8.11	30.05	8.11
Galley pack. A/Cond. Unit	1	7.50	440.00	16.59	21.00	3x4	30.05	0.44	13.22	30.05	13.22
Galley exh. Fan	1	1.50	440.00	3.67	6.00	3x1.5	30.05	0.27	8.11	30.05	8.11
Sanitary space fan	1	3.70	440.00	8.30	10.00	3x1.5	23.50	0.27	6.35	23.50	6.35

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ

Sundry space exhaust fan	1	1.80	440.00	4.25	6.00	3x1.5	25.80	0.27	6.97	25.80	6.97
Lift machine room fan	1	0.40	440.00	1.16	2.00	3x1.5	32.70	0.27	8.83	32.70	8.83
CO2 bottle room exh. Fan	1	0.80	440.00	2.12	3.00	3x1.5	34.50	0.27	9.32	34.50	9.32
<b>TOTAL</b>										<b>1216.54</b>	<b>1821.18</b>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΕΩΝ

ITEM	SE T	OUTPU T [kW]	VOLTA GE [V]	25% I <sub>y</sub> (A)	I (standar ) (A)	Nomina l Cross Section (mm <sup>2</sup> )	Cable' s Length (m)	Cable's specifi c weight (kg/m)	Cable's weight per consume r (kg)	Cable's total length (m)	Cable's total weight (kg)
<b>MISCELLANEOUS EQUIPMENT</b>											
Galley & laundry equipment	1		440.00	131.2	140.00	3x70	12.65	3.70	46.81	12.65	46.81
Prov. Ref. plant compressor	2	7.60	440.00	16.59	21.00	3x4	25.80	0.44	11.35	51.60	22.70
Elevator	1	7.50	440.00	16.59	21.00	3x4	12.65	0.44	5.57	12.65	5.57
Hot water circ. Pump	2	0.40	440.00	0.93	2.00	3x1.5	14.50	0.27	3.92	29.00	7.83
FW hydrophore pump	2	5.50	440.00	12.35	21.00	3x4	24.80	0.44	10.91	49.60	21.82
Sewage treatment plant	1	2.80	440.00	6.37	7.00	3x1.5	46.00	0.27	12.42	46.00	12.42
Sewage discharge pump for holding	2	2.60	440.00	5.79	6.00	3x1.5	46.00	0.27	12.42	92.00	24.84
<b>TOTAL</b>										<b>293.50</b>	<b>141.99</b>
<b>LIGHTING, NAV &amp; CONTROL EQUIPMENT</b>											
ICCP System	1		440.00	57.89	105.00	3x50	24.50	2.70	66.15	24.50	66.15
Space heater & others	1		440.00	9.65	10.00	3x1.5	24.50	0.27	6.62	24.50	6.62
Control & navigation equip.	1		440.00	48.24	52.50	3x16	24.50	1.09	26.71	24.50	26.71
Electric whistle	1		440.00	10.61	21.00	3x4	24.50	0.44	10.78	24.50	10.78
Em'cy & navigation lighting	1		440.00	52.49	52.50	3x16	24.50	1.09	26.71	24.50	26.71
Machinery space lighting	1		440.00	104.97	105.00	3x50	24.50	2.70	66.15	24.50	66.15
Accommodation lighting	1		440.00	39.36	41.00	3x10	24.50	0.79	19.36	24.50	19.36
Deck lighting	1		440.00	19.68	21.00	3x4	24.50	0.44	10.78	24.50	10.78
<b>TOTAL</b>										<b>147.00</b>	<b>233.24</b>
<b>TOTAL</b>										<b>10880.6</b>	<b>29931.4</b>

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ**

Βασική προϋπόθεση για να υπολογιστεί η καθαρά παρούσα αξία για ένα πλοίο είναι η γνώση του κόστους επένδυσης. Το κόστος επένδυσης περιλαμβάνει τα έξοδα για την ανέγερση του σκάφους. Το κόστος του άφορτου σκάφους μπορεί να αναλυθεί σε :

- Κόστος μεταλλικής κατασκευής πλοίου
- Κόστος ενδιαίτησης-εξοπλισμού
- Κόστος μηχανολογικής εγκατάστασης

Το κόστος τόσο της μεταλλικής κατασκευής όσο και του εξοπλισμού είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα βάρη τους. Στο παράρτημα αυτό υπολογίζονται τα βάρη τους. Το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης δεν θα υπολογιστεί στο παρόν παράρτημα, αφού αναλύεται στην ενότητα 5.5 της παρούσας διπλωματικής.

Για την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης το πλοίο μεταφοράς φυσικού αερίου θα θεωρηθεί ως ένα δεξαμενόπλοιο. Ο λόγος της παραδοχής αυτής είναι ότι δεν υπάρχουν εμπειρικοί τύποι για LNG carriers, αλλά και στο ότι ένα πλοίο φυσικού αερίου μπορεί να προσομοιωθεί με ένα δεξαμενόπλοιο με μικρότερο συντελεστή γάστρας.

### **B.1 Κόστος μεταλλικής κατασκευής**

Με τη χρήση του σχεδίου γενικής διάταξης για το υπό μελέτη πλοίο μετρούνται από το πρόγραμμα Autocad 2012 οι ζητούμενες αποστάσεις που απαιτούνται στις παρακάτω μεθόδους.

#### **A Μέθοδος Watson**

Το βάρος μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται με βάση τον δείκτη εξοπλισμού  $E_N$  του πλοίου κατά Lloyds Register:

$$E_N = L \cdot (B + T) + 0.8L \cdot (D - T) + 0.85 \sum_{i=1}^{N1} h_{1i} l_{1i} + 0.75 \sum_{i=1}^{N2} h_{2i} l_{2i}$$

όπου:

- $L= 283.2\text{m}$  ,  $B=44\text{m}$  ,  $D=26\text{m}$  ,  $T=12.52\text{m}$
- $N_1, h_{1i}, l_{1i}$ , αριθμός, ύψος και μήκος των υπερστεγασμάτων
- $N_2 h_{2i} l_{2i}$ , αριθμός, ύψος και μήκος των υπερκατασκευών

Γνωρίζοντας τον δείκτη εξοπλισμού, το βάρος μεταλλικής κατασκευής προκύπτει από τον τύπο:

$$W_{ST} = K \cdot E_N$$

όπου ο συντελεστής  $K$  είναι ο συντελεστής βαρών μεταλλικής κατασκευής και εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου.

Οι χώροι που υπάρχουν στο υπό μελέτη πλοίο ανάγονται στο χώρο που περιλαμβάνει το φουγάρο και τους βοηθητικούς χώρους, στο χώρο που είναι ο χώρος ενδιαίτησης και διακυβέρνησης του πλοίου, και στο χώρο που είναι ο χώρος συμπίεσης του φορτίου. Οι παραπάνω χώροι ορίζονται ως υπερστεγάσματα (πίνακας ΠΒ1). Ο πίνακας ΠΒ2 αναφέρεται στην υπερκατασκευή που βρίσκεται πρόωραθεν του πλοίου.

<b>Υπερστεγάσματα</b>		
<b>l (m)</b>	<b>h (m)</b>	<b>l x h (m<sup>2</sup>)</b>
16.81	4.28	71.95
16.81	2.68	45.05
16.81	2.83	47.57
16.81	2.77	46.56
7.61	8.40	63.92
19.73	3.94	77.74
19.75	2.93	57.87
19.77	3.00	59.31
19.79	2.99	59.17
18.11	2.95	53.42
15.00	2.92	43.80
22.59	7.31	165.13
13.90	4.61	64.08
<b>Total (m<sup>2</sup>)</b>		<b>855.58</b>

**Πίνακας ΠΒ1:** Αποτελέσματα μετρήσεων από την διαμήκη όψη του σχεδίου γενικής διάταξης του πλοίου. Με l συμβολίζεται το μήκος του υπερστεγάσματος, ενώ με h το ύψος του.

<b>Υπερκατασκευές</b>		
<b>l (m)</b>	<b>h (m)</b>	<b>l x h (m<sup>2</sup>)</b>
14.1	2.75	38.775
<b>Total (m<sup>2</sup>)</b>		<b>38.775</b>

**Πίνακας ΠΒ2:** Αποτελέσματα μετρήσεων από την διαμήκη όψη του σχεδίου γενικής διάταξης του πλοίου. Με l συμβολίζεται το μήκος της υπερκατασκευής, ενώ με h το ύψος του.

Για το υπό μελέτη πλοίο προκύπτει  $E_N = 19816.82$ . Θεωρώντας τιμή συντελεστή βάρους  $K = 0.032$  προκύπτει :

$$W_{ST} = 22341.7 \text{ tons}$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για  $C_B = 0.7$  στο 80% του κοίλου, οπότε για την περίπτωση μας απαιτείται διόρθωση. Ο νέος συντελεστής  $C_B$  για την εν λόγω μέθοδο είναι :

$$C'_B = C_B + (1 - C_B) \cdot \frac{0.8D - T}{3T} = 0.836$$

και

$$W_{ST} = W_{ST} \cdot (1 + 0.05 \cdot (C'_B - 0.7)) = 22493t$$

Τέλος, οι παραπάνω σχέσεις αναφέρονται σε κατασκευές που αποτελούνται κατά 100% από κανονικό χάλυβα. Στην περίπτωση μας οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται είναι υψηλής αντοχής και για το λόγο αυτό, απαιτείται μείωση της τάξης του 7.5%.

Οπότε

$$W_{ST} = 20806t$$

### **B' Μέθοδος Murray**

Η μέθοδος του Murray προσεγγίζει το βάρος μεταλλικής κατασκευής με τον ακόλουθο τύπο:

$$W_{ST} = 0.0328 \cdot L_{BP}^{1.65} \cdot \left( B + D + \frac{T}{2} \right) \cdot (0.5 \cdot C_B + 0.4)$$

Οπότε λαμβάνοντας μείωση 7.5% λόγω χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής προκύπτει για το υπό μελέτη πλοίο:

$$W_{ST} = 19619t$$

### **Γ' Μέθοδος Carreyette**

Η μέθοδος του Carreyette προσεγγίζει το βάρος μεταλλικής κατασκευής με τον ακόλουθο τύπο:

$$W_{ST} = C_B^{\frac{2}{3}} \cdot \left( L \cdot \frac{B}{6} \right) \cdot D^{0.72} \cdot \left( 0.002 \cdot \left( \frac{L}{D} \right)^2 + 1 \right)$$

Οπότε λαμβάνοντας μείωση 7.5% λόγω χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής προκύπτει για το υπό μελέτη πλοίο:

$$W_{ST} = 20814t$$

Τα συνοπτικά αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα ΠΒ3. Επιλέγεται ως τελική τιμή ο μέσος όρος των μεθόδων.

<b>Βάρος μεταλλικής κατασκευής (t)</b>	
Watson	20806
Murray	19619
Carreyette	20814
<b>Average</b>	<b>20413</b>

**Πίνακας ΠΒ3:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βάρους μεταλλικής κατασκευής μελετώμενου πλοίου

## **B.2 Κόστος ενδίαιτησης-εξοπλισμού**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το υπό μελέτη πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, προσεγγίστηκε από ένα δεξαμενόπλοιο. Όσο αφορά την ενδίαιτηση θα πρέπει να προστεθεί και το βάρος των μονώσεων και ενίσχυσης των δεξαμενών του φορτίου. Επομένως, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο για πλοία μήκους περί των 300 μέτρων

$$(W_{OT})' = K_{OT} \cdot L \cdot B$$



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

με τον συντελεστή  $K_{OT}$  να λαμβάνει τιμή  $0.24t/m^3$  προκύπτει :

$$(W_{OT})' = 2990t$$

Το βάρος το οποίο οφείλεται στην μόνωση και ενίσχυση των δεξαμενών φορτίου του πλοίου θα υπολογιστεί ως εξής: Από το σχέδιο γενικής διάταξης διαπιστώνεται ότι οι δεξαμενές του πλοίου έχουν πρισματική μορφή. Οι δεξαμενές αποτελούνται από δύο στρώματα μεμβράνης υλικού Invar. Το ειδικό του βάρος είναι  $8100t/m^3$ . Από προδιαγραφές της δεξαμενής το πάχος κάθε στρώματος Invar είναι 0.7mm. Επιπλέον υπάρχουν και δύο στρώματα ενίσχυσης με plywood στο οποίο έχει εγχυθεί σκόνη περλίτη. Το πρώτο έχει 230mm πάχος, ενώ το δεύτερο έχει 300mm. Από τα σχέδια γενικής διάταξης μπορεί να μετρηθεί το μήκος της δεξαμενής. Ο όγκος της μόνωσης υπολογίζεται ως το γινόμενο του μήκους της δεξαμενής επί το πάχος της μόνωσης επί την περίμετρο της δεξαμενής. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στο πρόγραμμα Autocad 2012.

Ενίσχυση με Invar						
Δεξαμενή	Μήκος (m)	Περίμετρος δεξαμενής (m)	Πάχος (m)	Στρώσεις μόνωσης	Πυκνότητα ( $t/m^3$ )	Βάρος (t)
4	51.6	114.38	0.0007	2	8.1	66.92877
3	50.4	114.38	0.0007	2	8.1	65.37229
2	50.4	114.38	0.0007	2	8.1	65.37229
1	33.6	114.38	0.0007	2	8.1	43.58153
<b>Total</b>						<b>241.2549</b>
Ενίσχυση με plywood						
Δεξαμενή	Μήκος (m)	Περίμετρος δεξαμενής (m)	Πάχος (m)	Στρώσεις μόνωσης	Πυκνότητα ( $t/m^3$ )	Βάρος (t)
4	51.6	114.38	0.23	1	0.5	678.7309
3	50.4	114.38	0.23	1	0.5	662.9465
2	50.4	114.38	0.23	1	0.5	662.9465
1	33.6	114.38	0.23	1	0.5	441.9643
<b>Total</b>						<b>2446.588</b>
Ενίσχυση με plywood						
Δεξαμενή	Μήκος (m)	Περίμετρος δεξαμενής (m)	Πάχος (m)	Στρώσεις μόνωσης	Πυκνότητα ( $t/m^3$ )	Βάρος (t)
4	51.6	114.38	0.3	1	0.5	885.3012
3	50.4	114.38	0.3	1	0.5	864.7128
2	50.4	114.38	0.3	1	0.5	864.7128
1	33.6	114.38	0.3	1	0.5	576.4752
<b>Total</b>						<b>3191.202</b>

Συνεπώς προκύπτει ότι το συνολικό βάρος των μονώσεων ανέρχεται σε : **5879t**. Οπότε, για το πλοίο προκύπτει ότι βάρος εξοπλισμού-ενδιαίτησης αντιστοιχεί σε:

$$W_{OT} = 8869t$$

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΙΝΑΚΩΝ-ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

### **Γ.1 Σχήματα**

**Σχήμα 1.1:** Το παγκόσμιο θαλάσσιο εμπόριο 2012

**Σχήμα 1.2:** Συνεισφορά μεταφορών στην ατμοσφαιρική ρύπανση αναλογικά με το μεταφορικό τους έργο (gr/tn-km)

**Σχήμα 1.3:** Εκπομπές που οφείλονται στην δραστηριότητα των πλοίων και συσχέτιση με την κλιματική αλλαγή (IMO 2009)

**Σχήμα 1.4:** Αρχή λειτουργίας Wet Scrubber

**Σχήμα 1.5:** Κλασματική απόσταξη αργού πετρελαίου

**Σχήμα 1.6:** Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων Dual Fuel μηχανής που καίει αριστερά μόνο HFO και δεξιά LNG (MAN)

**Σχήμα 1.7:** Διεργασία υγροποίησης εννέα βαθμίδων σε σειρά

**Σχήμα 1.8:** Διεργασία υγροποίησης με μίγμα ψυκτικών

**Σχήμα 1.9:** Αναπαράσταση αύξησης της χωρητικότητας LNG carriers

**Σχήμα 1.10:** Ο στόλος LNG σε παγκόσμιο επίπεδο

**Σχήμα 1.11:** Αναπαράσταση της θεμελιώδους αρχής του EEDI

**Σχήμα 1.12:** Σχηματική αναπαράσταση των αντικειμένων υπολογισμού για τον EEDI

**Σχήμα 2.1:** S/S Normandie

**Σχήμα 2.2:** Γενικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου ενέργειας πλοίου

**Σχήμα 2.3:** Σύγχρονη ηλεκτρογεννήτρια

**Σχήμα 2.4:** Κυκλομετατροπέας 12 παλμών που τροφοδοτεί τριφασικό κινητήρα

**Σχήμα 2.5:** Wartsila 6L50DF. Αποδίδει 5700kW στις 500rpm

**Σχήμα 2.6:** Βαθμός απόδοσης από την παροχή καυσίμου έως τον άξονα της προπέλας ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης διπλού καυσίμου σε σύγκριση με ένα σύστημα πρόωσης ατμού.

**Σχήμα 3.1:** Turbinia, το πρώτο ατμοστροβιλοκίνητο πλοίο

**Σχήμα 3.2:** Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης ατμού

**Σχήμα 3.3:** Σύστημα απλού κύκλου Rankine

**Σχήμα 3.4:** Σχηματική αναπαράσταση διαγράμματος κύκλου Rankine συντεταγμένες T-S

**Σχήμα 3.5:** Τομή στροβίλου

**Σχήμα 3.6:** Σχηματική αναπαράσταση στροβίλου

**Σχήμα 3.7:** Διάταξη πλοίου με σύστημα πρόωσης με ατμό

**Σχήμα 5.1:** Τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης. Με πράσινο χρώμα συμβολίζεται το BOG, ενώ με κίτρινο το HFO. Στο σχήμα δεν παρουσιάζονται οι μετασχηματιστές.

## Γ.2 Διαγράμματα

**Διάγραμμα 1.1:** Επιτρεπόμενες εκπομπές NO<sub>x</sub> κατά IMO

**Διάγραμμα 1.2:** Επιτρεπόμενες εκπομπές SO<sub>x</sub> κατά IMO

**Διάγραμμα 1.3:** Απαιτούμενη τιμή EEDI μέχρι 31/12/2019 για διάφορους τύπους πλοίων

**Διάγραμμα 4.1:** Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (B.S.R.A)

**Διάγραμμα 4.2:** Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (B.S.R.A)

**Διάγραμμα 4.3:** Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (FORMDATA)

**Διάγραμμα 4.4:** Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (FORMDATA)

**Διάγραμμα 4.5:** Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (LAP/KELLER)

**Διάγραμμα 4.6:** Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου (LAP/KELLER)

**Διάγραμμα 4.7:** Γραφική απεικόνιση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου για τις μεθόδους B.S.R.A-FORMDATA-LAP/KELLER

**Διάγραμμα 4.8:** Γραφική απεικόνιση της απαιτούμενης ισχύος ρυμούλκησης συναρτήσει της ταχύτητας του πλοίου για τις μεθόδους B.S.R.A-FORMDATA-LAP/KELLER

**Διάγραμμα 4.9:** SHP-grm για καθαρή γάστρα και ήρεμο νερό

**Διάγραμμα 5.1:** Σύγκριση πλοίου με ηλεκτροπρόωση με τα όρια αναφοράς (IMO)

**Διάγραμμα 5.2:** Σύγκριση πλοίου με ηλεκτροπρόωση ως προς τα όρια αναφοράς (CTMI)

**Διάγραμμα 5.3:** Σχηματική απεικόνιση ενεργειακού δείκτη EEDI για ένα εύρος σημείων λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών.

**Διάγραμμα 5.4:** Σύγκριση δείκτη EEDI για λειτουργία 3 και 4 γεννητριών για ένα εύρος σημείων λειτουργίας ταχυτήτων

**Διάγραμμα 5.5:** Ταχύτητα πλοίου ανά σημείο φόρτισης για λειτουργία φόρτισης 3 ή 4 γεννητριών

**Διάγραμμα 5.6:** Δίκτυο Υψηλής Τάσης ηλεκτροκίνητου πλοίου

**Διάγραμμα 5.7:** Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης πλοίου με ηλεκτροπρόωση

**Διάγραμμα 5.8:** Γραφική αναπαράσταση κόστους ανέγερσης πλοίου με ηλεκτροπρόωση

**Διάγραμμα 5.9:** Αναλυτικό κόστος αναλώσιμων

**Διάγραμμα 5.10:** Κόστος λειτουργίας πλοίου φυσικού αερίου με ηλεκτροπρόωση

**Διάγραμμα 6.1:** Σύγκριση ατμοκίνητου πλοίου με τα όρια αναφοράς (ΙΜΟ)

**Διάγραμμα 6.2:** Γραφική αναπαράσταση κόστους ανέγερσης πλοίου με ηλεκτροπρόωση

**Διάγραμμα 6.3:** Αναλυτικό κόστος αναλώσιμων

**Διάγραμμα 6.4:** Κόστος λειτουργίας ατμοκίνητου πλοίου φυσικού αερίου

**Διάγραμμα 7.1:** Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης μελετώμενων πλοίων

**Διάγραμμα 7.2:** Κόστος ανέγερσης πλοίων

**Διάγραμμα 7.3:** Κόστος λειτουργίας πλοίων

### Γ.3 Πίνακες

**Πίνακας 1.1:** Σύγκριση Η.Φ.Ο. και Η.Φ.Ο. low sulphur

**Πίνακας 1.2:** Σύσταση φυσικού αερίου

**Πίνακας 1.3:** Συντελεστής εκπομπής CO<sub>2</sub> για κάθε τύπο καυσίμου

**Πίνακας 1.4:** Συντελεστές  $f_{j0}$  και  $f_{j,min}$  για πλοία ειδικού σχεδιασμού

**Πίνακας 1.5:** Συντελεστές  $f_{i0}$  και  $f_{i,min}$  για πλοία ειδικού σχεδιασμού

**Πίνακας 4.1:** Βασικές διαστάσεις υπό μελέτη πλοίου

**Πίνακας 4.2:** Αρχική τιμή συντελεστή © για τις ταχύτητες 15.9kn-20.9kn

**Πίνακας 4.3:** Διορθώσεις συντελεστή © για λόγο B/T και λόγο λυγηρότητας

**Πίνακας 4.4:** Διόρθωση συντελεστή © για το LCB

**Πίνακας 4.5:** Ολική διόρθωση συντελεστή ©

**Πίνακας 4.6:** Διόρθωση του συντελεστή αντίστασης © λόγω διαφοράς μήκους

**Πίνακας 4.7:** Ολικός συντελεστής αντίστασης για το υπό μελέτη πλοίο

**Πίνακας 4.8:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέθοδο αντίστασης B.S.R.A

**Πίνακας 4.9:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέθοδο αντίστασης FORMDATA

**Πίνακας 4.10:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέθοδο αντίστασης Lap-Keller

- Πίνακας 4.11:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σειρών αντίστασης
- Πίνακας 4.12:** Τελικά αποτελέσματα για το υπό μελέτη πλοίο για τις πειραματικές μεθόδους
- Πίνακας 4.13:** Σύγκριση πειραματικών μεθόδων με μέθοδο Holtrop & Mennen
- Πίνακας 4.14:** Αποτελέσματα προγράμματος grid για την ταχύτητα υπηρεσίας
- Πίνακας 4.15:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προγράμματος grid.
- Πίνακας 4.16:** Απαίτηση ισχύος για την αντίστοιχη ταχύτητα
- Πίνακας 5.1:** Ειδική κατανάλωση καυσίμου για την γεννήτρια *WARTSILA 9L50DF*
- Πίνακας 5.2:** Τιμή EEDI υπό μελέτη πλοίου κατά IMO
- Πίνακας 5.3:** Τιμή EEDI υπό μελέτη πλοίου κατά CTMI
- Πίνακας 5.4:** Τιμές EEDI και όρια αναφοράς
- Πίνακας 5.5:** Παρουσίαση των αναγκών σε ισχύ για τη λειτουργία και την πρόωση του πλοίου σε κατάσταση εν πλω και με κατανάλωση του αντίστοιχου καυσίμου. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από λεπτομερή ηλεκτρολογικό ισολογισμό
- Πίνακας 5.6:** Χαρακτηριστικοί βαθμοί απόδοσης των εγκατεστημένων ηλεκτρογεννητριών
- Πίνακας 5.7:** Υπολογισμός ταχύτητας πλοίου ανά σημείο λειτουργίας των γεννητριών
- Πίνακας 5.8:** Υπολογισμός  $EEDI_{estimated}$  ανάλογα με το σημείο λειτουργίας των γεννητριών
- Πίνακας 5.9:** Υπολογισμός ταχύτητας με 3 γεννήτριες σε λειτουργία.
- Πίνακας 5.10:** Υπολογισμός  $EEDI_{estimated}$  για 3 γεννήτριες σε λειτουργία.
- Πίνακας 5.11:** Επίπεδα εκπομπών CO<sub>2</sub> για την μηχανή 9L50DF
- Πίνακας 5.12:** Αποτελέσματα ηλεκτρολογικού ισολογισμού
- Πίνακας 5.13:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης καυσίμων & λιπαντικών
- Πίνακας 5.14:** Προωστήρια μηχανήματα ηλεκτροκίνητου πλοίου
- Πίνακας 5.15:** Υπόλοιπα μηχανήματα ηλεκτροκίνητου πλοίου
- Πίνακας 5.16:** Συνολικό μήκος και βάρος καλωδιώσεων
- Πίνακας 5.17:** Χρήσιμες τιμές για τους ακόλουθους υπολογισμούς από το παράρτημα Β
- Πίνακας 5.18:** Κόστος μηχανημάτων ηλεκτροπρόωσης
- Πίνακας 5.19:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κόστους ανέγερσης ηλεκτροκίνητου πλοίου
- Πίνακας 5.20:** Τιμές καυσίμων 21/2/2015 για το λιμάνι της Σιγκαπούρης

**Πίνακας 5.21:** Αναλυτικό κόστος αναλώσιμων

**Πίνακας 5.22:** Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση.

**Πίνακας 5.23:** Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο με ηλεκτροπρόωση υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος του φυσικού αερίου επιβαρύνει τον ναυλωτή.

**Πίνακας 6.1:** Τιμή EEDI υπό μελέτη ατμοκίνητου πλοίου κατά IMO

**Πίνακας 6.2:** Τιμή EEDI υπό μελέτη ατμοκίνητου πλοίου κατά IMO λαμβάνοντας υπόψιν και την ντιζελογεννήτρια

**Πίνακας 6.3:** Ημερήσια κατανάλωση καυσίμου

**Πίνακας 6.4:** Ετήσια κατανάλωση λιπαντικών

**Πίνακας 6.5:** Προωστήρια μηχανήματα ατμοκίνητου πλοίου

**Πίνακας 6.6:** Προωστήρια μηχανήματα ατμοκίνητου πλοίου

**Πίνακας 6.7:** Βάρος γάστρας μελετώμενου πλοίου

**Πίνακας 6.8:** Προωστήρια μηχανήματα ατμοκίνητου πλοίου

**Πίνακας 6.9:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κόστους ανέγερσης ατμοκίνητου πλοίου

**Πίνακας 6.11:** Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο πρόωσης με ατμό.

**Πίνακας 6.12:** Ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος και δείκτης επένδυσης, συναρτήσει του ποσοστού δανειοδότησης για το πλοίο πρόωσης με ατμό υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος του φυσικού αερίου επιβαρύνει τον ναυλωτή.

**Πίνακας 7.1:** Σύγκριση τιμών EEDI για το ατμοκίνητο και το ηλεκτροκίνητο πλοίο

**Πίνακας 7.2:** Κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών

**Πίνακας 7.3:** Σύγκριση βάρους μηχανολογικού εξοπλισμού

**Πίνακας 7.4:** Κόστος επένδυσης και ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος

**Πίνακας 7.5:** Κόστος επένδυσης και ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος με το κόστος του καταναλισκόμενου φυσικού αερίου να επιβαρύνει τον ναυλωτή.