

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**



ΔΠΜΣ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

Διπλωματική Εργασία

“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”

Παναγιώτης-Φανούρης Αρμάος

A.M: ΜΝΣΝΔ 20009

Επιβλέπων:

Ιωάννης Κατσάνης

Πειραιάς

Μάρτιος 2022

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ ‘Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία’.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΝΔ Ιωάννης Κατσάνης (Επιβλέπων)
- Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΝΔ Θεόδωρος Ζάννης
- Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΝΔ Ευθύμιος Παριώτης

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα.



*Παναγιώτης - Φανούρης Αρμάος,
“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ιωάννη Κατσάνη για την πολύτιμη καθοδήγησή του, χωρίς την οποία δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω την παρούσα μελέτη.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον κύριο Θεόδωρο Ζάννη και τον κύριο Ευθύμιο Παριώτη, για τις χρήσιμες συμβουλές και διορθώσεις τους.

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία στον πρόσφατα εκπλιπόντα θείο μου, ο οποίος πάντα με παρότρυνε στην προσπάθεια της προσωπικής μου ανέλιξης.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την εύρεση του οικονομικότερου, από πλευράς κατανάλωσης καυσίμου, συνδυασμένου συστήματος πρόωσης πλοίου επιφανείας. Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας αρχικά παρουσιάζονται οι κατηγορίες των μηχανών εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία (τετράχρονοι, δίχρονοι, αεριοστρόβιλοι) και στη συνέχεια γίνεται διεξοδική ανάλυση όλων των συνδυασμένων συστημάτων πρόωσης που χρησιμοποιούνται στα πλοία επιφανείας. Στο πρακτικό και δεύτερο μέρος της εργασίας εκπονείται σενάριο αποστολής πλοίου επιφανείας τύπου φρεγάτας (Φ/Γ), 5200 τόνων, για την κάλυψη απόστασης 5000 ναυτικών μιλίων με διάφορες ταχύτητες πλεύσης. Στα πλαίσια της μελέτης, το σενάριο εκτελέστηκε δύο φορές από τον ίδιο τύπο πλοίου με διαφορετικό συνδυασμένο σύστημα πρόωσης κάθε φορά (CODAD & CODLAG) έτσι ώστε να αναδειχτεί το οικονομικότερο, ως προς την κατανάλωση καυσίμου, συνδυασμένο σύστημα. Με την ολοκλήρωση της μελέτης, το συνδυασμένο σύστημα πρόωσης CODAD αναδείχθηκε το οικονομικότερο ως προς την κατανάλωση καυσίμου.

Λέξεις – Κλειδιά

Φρεγάτα, συνδυασμένο σύστημα πρόωσης, κατανάλωση καυσίμου



*Παναγιώτης - Φανούρης Αρμάος,
“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”*

ABSTRACT

This dissertation was prepared in order to find the most economical, in terms of fuel consumption, combined surface propulsion system. In the theoretical part of the work, first the categories of internal combustion engines used in shipping (four-stroke, two-stroke, gas turbines) are presented and then a detailed analysis of all the combined propulsion systems used in surface ships is made. In the practical and second part of the work, a scenario of sending a frigate type surface ship (F/G), 5200 tons, is prepared, to cover a distance of 5000 nautical miles with different cruising speeds. As part of the study, the scenario was performed twice by the same type of ship with a different combined propulsion system each time (CODAD & CODLAG) in order to point out the most economical, in terms of fuel consumption, combined system. At the end of the study, the combined CODAD propulsion system proved to be the most economical in terms of fuel consumption.

Key – Words

Frigate, combined propulsion system, fuel consumption



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	IV
ABSTRACT	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	VI
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ.....	VIII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	IX
ΠΙΝΑΚΕΣ	X
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ	XI
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	1
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
2. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....	2
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	2
2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ	2
2.2.1 ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΕΣ ΜΕΣΟΣΤΡΟΦΕΣ/ΤΑΧΥΣΤΡΟΦΕΣ DIESEL	4
2.2.2 ΔΙΧΡΟΝΕΣ DIESEL.....	5
2.2.3 ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ	5
3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	7
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	7
3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ - COMBINED DIESEL AND DIESEL (CODAD)	8
3.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	9
3.3.1 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED DIESEL AND GAS (CODAG)	10
3.3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ Η ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED DIESEL OR GAS (CODOG)	12
3.3.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ - COMBINED DIESEL-ELECTRIC AND GAS (CODLAG)	13
3.3.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΕΛΙΚΩΝ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΔΕΣΜΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ – COMBINED DIESEL AND GAS - WATER JET AND REFINED PROPELLER.....	15
3.3.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CODOGX & CODAGX	17
3.3.6 ΣΥΣΤΗΜΑ COGAGX-DX	17
3.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ.....	18
3.4.1 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED GAS AND GAS (COGAG).....	19
3.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ INTEGRATED GAS TURBINE ELECTRIC (IGTE)	19
3.4.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ Η ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED GAS OR GAS (COGOG)	20
3.4.4 ΣΥΣΤΗΜΑ COGAGX.....	21
3.5 ΆΛΛΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ	21
3.5.1 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED GAS AND STEAM (COGAS)	22
3.5.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΣΗΣ - COMBINED GAS ELECTRIC STEAM (COGES).....	22
3.5.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED STEAM AND GAS (COSAG)	23



3.5.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΩΝ - COMBINED NUCLEAR AND GAS (CONAG).....	24
3.5.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΩΝ - COMBINED NUCLEAR AND STEAM (CONAS).....	25
3.5.6 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ ΤΥΠΟΥ CODLAD (COMBINED DIESEL ELECTRIC AND DIESEL) ΚΑΙ CODLOD (COMBINED DIESEL ELECTRIC OR DIESEL)	25
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΦΡΕΓΑΤΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	27
4.1 ΠΡΟΦΙΛ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	27
4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ CODAD	30
4.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ HIGH PATROL (18 KNOTS).....	34
4.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ TRANSIT PATROL (24 KNOTS).....	34
4.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ SPRINT PATROL (29 KNOTS).....	35
4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ CODLAG.....	37
4.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ HIGH PATROL (18KNOTS).....	39
4.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ TRANSIT PATROL (24KNOTS).....	40
4.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ SPRINT PATROL (29 KNOTS).....	40
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	46



ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ - ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Κατανομή ταχυτήτων φρεγάτας εκτοπίσματος 5.200 τόνων.	28
Σχήμα 2. Απαιτούμενη ισχύς για 5.200 τόνους φρεγάτα σε σχέση με την ταχύτητα (Roumeliotis, et al., 2018).....	29
Γράφημα 1. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σαν συνάρτηση του φορτίου του πετρελαιοκινητήρα (engine load %) Wärtsilä 16V31.	33
Γράφημα 2. Κατανάλωση καυσίμου φρεγάτας ανά ταχύτητα πλεύσης, με συνδυασμένο σύστημα CODAD.	37
Γράφημα 3. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σαν συνάρτηση του φορτίου του αεριοστροβίλου (engine load %) GE LM2500+. (Roumeliotis, et al., 2018)	39
Γράφημα 4. Κατανάλωση καυσίμου φρεγάτας ανά ταχύτητα πλεύσης, με συνδυασμένο σύστημα CODLAG.....	43
Γράφημα 5. Κατανάλωση ανά ταχύτητα πλεύσης συστημάτων, CODAD & CODLAG εγκατεστημένα στον ίδιο τύπο πλοίου για δεδομένο σενάριο αποστολής.....	44
Γράφημα 6. Κατανάλωση αποστολής, CODAD & CODLAG εγκατεστημένα στον ίδιο τύπο πλοίου για δεδομένο σενάριο αποστολής.	45



ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Τετράχρονη κύρια ναυτική μηχανή Diesel της MTU. (Ζάννης, 2020-2021).....	3
Εικόνα 2. Τετράχρονη ηλεκτρομηχανή (H/Z) της MTU. (Ζάννης, 2020-2021)	3
Εικόνα 3. Ναυτικός αεριοστρόβιλος της Rolls-Royce (MT30). (Από το Διαδίκτυο)	6
Εικόνα 4. Διάταξη συστήματος CODAD με δύο ζεύγη όμοιων πετρελαιοκινητήρων που κινούν δύο έλικες σε μορφή U-Arrangement και T-Arrangement. (Ohmayer, 2012).....	9
Εικόνα 5. Συνδυασμένο σύστημα πρόωσης CODAG. (Ohmayer, 2012).....	11
Εικόνα 6. Συνδυασμός δύο ομοίων πετρελαιοκινητήρων και ενός αεριοστροβίλου σε διάταξη CODAG, για την κίνηση δύο ελίκων. (Από το διαδίκτυο)	12
Εικόνα 7. Συνδυασμένο σύστημα πρόωσης CODOG. (Ohmayer, 2012).....	12
Εικόνα 8. Συνδυασμός δύο όμοιων πετρελαιοκινητήρων και δύο όμοιων αεριοστρόβιλων σε διάταξη CODOG, για την κίνηση δύο ελίκων μεταβλητού βήματος. (Από το διαδίκτυο)	13
Εικόνα 9. Συνδυασμένο σύστημα πρόωσης CODELAG. (Ohmayer, 2012).....	14
Εικόνα 10. Συνδυασμός τεσσάρων ομοίων πετρελαιοκινητήρων (ηλεκτροπαραγωγών ζευγών) και ενός αεριοστροβίλου σε διάταξη CODLAG, για την κίνηση δύο ελίκων. (Από το διαδίκτυο)	15
Εικόνα 11. Διάταξη CODAG-WARP δύο όμοιων πετρελαιοκινητήρων που δίνουν κίνηση σε δύο έλικες μέσω μειωτήρων και ενός αεριοστροβίλου που παρέχει ισχύ σε σύστημα δέσμης νερού. (Κλιάνης, et al., 2018).....	16
Εικόνα 12. Διάταξη COGAGX-DX που συνδυάζει έναν πετρελαιοκινητήρα και δύο αεριοστροβίλους για την κίνηση δύο ελίκων. (Κλιάνης, et al., 2018).....	18
Εικόνα 13. Συνδυασμός τεσσάρων όμοιων αεριοστροβίλων σε διάταξη COGAG για την κίνηση δύο ελίκων. (Κλιάνης, et al., 2018).....	19
Εικόνα 14. Συνδυασμός δύο ομοίων και ενός μικρότερου αεριοστροβίλου για την κίνηση δύο ελίκων, με τη χρήση πλήρους ηλεκτρικής προώσεως (IGTE). (Κλιάνης, et al., 2018)	20
Εικόνα 15. Συνδυασμός ενός μεγαλύτερης ισχύος αεριοστρόβιλου με έναν μικρότερης ισχύος σε διάταξη (COGOG) για την κίνηση μίας προπέλας. (Roumeliotis, et al., 2018).21	
Εικόνα 16. Σκαριφηματική διάταξη συστήματος πρόωσης COGES. (Από το διαδίκτυο).23	
Εικόνα 17. Σκαριφηματική διάταξη συστήματος πρόωσης COSAG. (Από το διαδίκτυο).24	
Εικόνα 18. Σκαριφηματική διάταξη συστήματος πρόωσης CONAG. (Από το διαδίκτυο)24	
Εικόνα 19. Φρεγάτα τύπου Belharra. (Από το Διαδίκτυο)	27
Εικόνα 20. Πετρελαιοκινητήρας Wärtsilä 31. (Από το διαδίκτυο).....	30
Εικόνα 21. Αεριοστρόβιλος GE LM2500+. (Από το διαδίκτυο).....	37



ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Κατανομή ταχυτήτων και του αντίστοιχου χρόνου χρήσης ως ποσοστό (%) του συνολικά απαιτηθέντος χρόνου και της αντίστοιχης συνολικής απαιτούμενης ισχύος (kW).	29
Πίνακας 2. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σε σχέση με το φορτίο (%) του πετρελαιοκινητήρα (engine load %) Wärtsilä 16V31 (Wartsila, 2022).	32
Πίνακας 3. Συνολική κατανάλωση καυσίμου σε τόνους (t) της φρεγάτας 5.200 τόνων (t) με συνδυασμένο σύστημα (CODAD) για αποστολή 5000 ναυτικών μιλίων (nmi).	36
Πίνακας 4. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σε σχέση με το φορτίο (%) του (H/Z) (engine load %) Wärtsilä 8V31 (Wartsila, 2022).	38
Πίνακας 5. Συνολική κατανάλωση καυσίμου σε τόνους (t) της φρεγάτας 5.200 τόνων (t) με συνδυασμένο σύστημα (CODAD) για αποστολή 5000 ναυτικών μιλίων (nmi).	42



ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

MEK: Μηχανή Εσωτερικής Καύσεως

SFOC: Specific Fuel Oil Consumption

CPPς: Controllable Pitch Propellers

CODAD: Combined Diesel and Diesel

CODAG: Combined Diesel and Gas

CODOG: Combined Diesel or Gas

CODLAG: Combined diesel-Electric and Gas

CODAG-WARP: Combined Diesel and Gas-Water jet and Refined Propeller

CODLOG: Combined diesel-Electric or Gas

COGAG: Combined Gas and Gas

IGTE: Integrated Gas Turbine Electric

H/Z: Ηλεκτροπαραγωγή Ζεύγη

COGOG: Combined Gas or Gas

COGAS: Combined Gas and Steam

COGES: Combined Gas Electric Steam

COSAG: Combined Steam and Gas

CONAG: Combined Nuclear and Gas

CONAS: Combined Nuclear and Steam

CODLAD: Combined Diesel electric and Diesel

CODLOD: Combined Diesel electric or Diesel



1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μία εισαγωγή στην εργασία και διατυπώνει τον σκοπό και την δομή της.

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση του συνδυασμένου συστήματος πρόωσης πλοίου επιφανείας τύπου φρεγάτας (Φ/Γ), με τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, μέσα από την μελέτη αποστολής 5000 ναυτικών μιλίων. Γι' αυτό το λόγο προηγήθηκε βιβλιογραφική έρευνα σε επιστημονικά βιβλία μηχανολογίας, σε επιστημονικά άρθρα ναυπηγικής και σε ιστοσελίδες εταιριών κατασκευής συστημάτων πρόωσης πλοίων επιφανείας.

1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία δομήθηκε σε πέντε κεφάλαια. Στη συνέχεια αναλύεται συνοπτικά το περιεχόμενό τους.

Το **Κεφάλαιο 1** είναι η παρούσα εισαγωγή.

Το **Κεφάλαιο 2** ασχολείται με τα συστήματα τα οποία απαρτίζουν ένα σύστημα πρόωσης. Αρχικά, γίνεται αναφορά στον ορισμό της θερμικής μηχανής και στη συνέχεια παραθέτονται τα είδη των ναυτικών μηχανών εσωτερικής καύσης.

Το **Κεφάλαιο 3** περιγράφει αναλυτικά όλα τα συνδυασμένα συστήματα πρόωσης πλοίων επιφανείας τα οποία υπάρχουν.

Το **Κεφάλαιο 4** αναλύει το σενάριο αποστολής μίας Φ/Γ 5200 τόνων για την κάλυψη απόστασης 5000 ναυτικών μιλίων με συγκεκριμένες ταχύτητες πλεύσης, με τα συνδυασμένα συστήματα πρόωσης CODAD & CODLAG.

Το **Κεφάλαιο 5** συγκρίνει τα αποτελέσματα του σεναρίου αποστολής του Κεφαλαίου 4 και καταλήγει σε συμπεράσματα.



2. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η παραγωγή έργου με τη χρήση μίας θερμικής μηχανής βασίζεται στην πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της ενεργειακής του καταστάσεως. Τμήμα αυτής της ενέργειας μπορεί να αποδοθεί ως μηχανικό έργο, ενώ το υπόλοιπο αποβάλλεται ξανά ως θερμότητα στο περιβάλλον. Η πρόσδοση της θερμότητας μπορεί να γίνεται είτε εντός του κύριου τμήματος της μηχανής είτε σε ανεξάρτητο τμήμα της. Επομένως οι θερμικές μηχανές διακρίνονται στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως-ΜΕΚ (Internal Combustion Engines) όπου η καύση για την παραγωγή της αναγκαίας θερμότητας πραγματοποιείται εντός της μηχανής, ενώ το εργαζόμενο μέσο είναι το καυσαέριο. Και στις Μηχανές Εξωτερικής Καύσεως, όπου η θερμότητα προσδίδεται στο εργαζόμενο μέσο σε ανεξάρτητη συσκευή της μηχανής, ενώ τα καυσαέρια δεν έρχονται σε επαφή με το εργαζόμενο μέσο. Παράδειγμα μηχανής εξωτερικής καύσεως είναι η ατμομηχανή, όπου η παραγόμενη από την καύση θερμότητα εντός του λέβητα μετατρέπεται στο νερό (εργαζόμενο μέσο) σε ατμό, το οποίο με τη σειρά του οδηγείται σε κύλινδρο (το κύριο τμήμα της μηχανής). Η μετακίνηση ενός εμβόλου κατά την εκτόνωση του ατμού εντός του κυλίνδρου παράγει το ωφέλιμο έργο της μηχανής. (Κλιάνης, et al., 2017)¹

2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

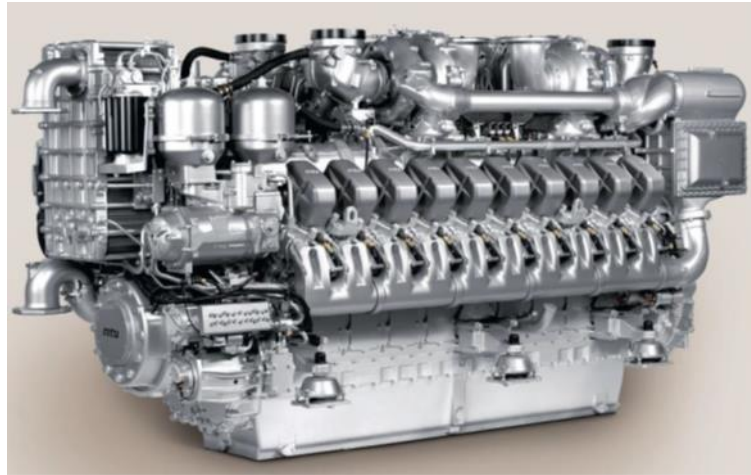
Οι εμβολοφόρες ναυτικές Μ.Ε.Κ διακρίνονται ανάλογα με την χρήση σε:

- Κύριες μηχανές Diesel ή Otto (μηχανές πρόωσης), οι οποίες είναι δίχρονες ή τετράχρονες ανάλογα με τον τύπο και τις ανάγκες του σκάφους. Για την πρόωση μικρών σκαφών, επιβατηγών-πλοίων ακτοπλοΐας και πολεμικών σκαφών

¹ Κλιάνης, Λ. Χ., Νικολός, Ι. Κ. & Σιδέρης, Ι. Α., 2017. *Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως*. Β' Έκδοση επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.



χρησιμοποιούνται τετράχρονοι πετρελαιοκινητήρες ενώ για την πρόωση μεγάλων εμπορικών πλοίων χρησιμοποιούνται δίχρονοι πετρελαιοκινητήρες. Για την κίνηση μικρών σκαφών χρησιμοποιούνται επίσης είτε δίχρονες είτε τετράχρονες εξωλέμβιες μηχανές Otto και τελευταία τετράχρονες αεριομηχανές Otto για την πρόωση πλοίων ακτοπλοΐας-πορθμείων. (Ζάννης, 2020-2021)²



Εικόνα 1. Τετράχρονη κύρια ναυτική μηχανή Diesel της MTU. (Ζάννης, 2020-2021)

- Ηλεκτρομηχανές (Τετράχρονες Diesel ή Τετράχρονες Otto).



Εικόνα 2. Τετράχρονη ηλεκτρομηχανή (H/Z) της MTU. (Ζάννης, 2020-2021)

² Ζάννης, Θ. Κ., 2020-2021. *Βασικά Στοιχεία Ναυτικών Μηχανών Πρόωσης και Βοηθητικών Συστημάτων Πλοίου*. Πειραιάς: Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ναυπηγικής & Ναυτικής Μηχανολογίας.



Επίσης ανάλογα με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα και τον τρόπο λειτουργίας διακρίνονται σε:

- Αργόστροφες, με ταχύτητα περιστροφής έως 350rpm (κύριες μηχανές πλοίων).
- Μεσόστροφες, με ταχύτητα περιστροφής έως 1500rpm (μηχανές πλοίων, τρένων και ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη).
- Πολύστροφες, με ταχύτητα περιστροφής μέχρι 5000rpm (μηχανές τροχοφόρων).
- Ταχύστροφες, με ταχύτητα περιστροφής άνω των 5000rpm. (Ζάννης, 2020-2021)

2.2.1 Τετράχρονες Μεσόστροφες/Ταχύστροφες Diesel

Οι τετράχρονες μεσόστροφες/ταχύστροφες Diesel κατασκευάζονται με διάταξη κυλίνδρων σε σειρά ή σε διάταξη V και είναι όλες στροβιλο-υπερπληρωμένες. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την κίνηση μικρών σκαφών, για την πρόωση πολεμικών πλοίων και πλοίων ειδικών εφαρμογών όπως πλοία αναψυχής και οχηματαγωγά. Επίσης χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρομηχανές (μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) για την κάλυψη αναγκών του πλοίου. (Ζάννης, 2020-2021)

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής τετράχρονης αντί δίχρονης μηχανής Diesel είναι τα ακόλουθα:

1. Η καλύτερη εκμετάλλευση του όγκου του πλοίου, λόγω του μικρότερου ύψους τους σε σχέση με τις δίχρονες Diesel, το οποίο επιτρέπει την κατασκευή μηχανοστασίου με μικρότερο ύψος.
2. Ο μικρότερος χρόνος κατασκευής και συναρμολόγησης σε σχέση με τις δίχρονες Diesel.
3. Η κατά 20 έως 30% ελαφρύτερη συνολική εγκατάσταση (μαζί με παρελκόμενα και μειωτήρες) σε σχέση με της ίδιας ισχύος δίχρονης εγκατάστασης και με μικρότερο κόστος αγοράς. (Ζάννης, 2020-2021)

Και τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

1. Η μεγαλύτερη πιθανότητα βλάβης λόγω της πιο πολύπλοκης εγκατάστασης και των περισσότερων κινούμενων μερών (μεγαλύτερος αριθμός κυλίνδρων).



2. Η δυσκολία στην καύση καυσίμου εξαιρετικά χαμηλής ποιότητας.
3. Το αυξημένο κόστος λειτουργίας λόγω της μεγαλύτερης κατανάλωσης λιπαντικού.
(Ζάννης, 2020-2021)

2.2.2 Δίχρονες Diesel

Οι αργόστροφες Diesel κυριαρχούν στο χώρο της πρόωσης μεγάλων ποντοπόρων εμπορικών πλοίων. Είναι δίχρονες μηχανές με ζύγωμα και γενικά συνδέονται απευθείας με την έλικα του πλοίου χωρίς ανάγκη μείωσης στροφών και χρήσης συμπλεκτών και είναι όλες υπερπληρωμένες.

Τα πλεονεκτήματα των δίχρονων αργόστροφων Diesel είναι τα ακόλουθα:

1. Η ικανότητα καύσης κακής ποιότητας καυσίμου χωρίς προβλήματα.
2. Η απλότητα της κατασκευής λόγω του μικρότερου αριθμού των κυλίνδρων και γενικά εξαρτημάτων για δεδομένη ισχύ καθώς και απουσία μειωτήρα στροφών.

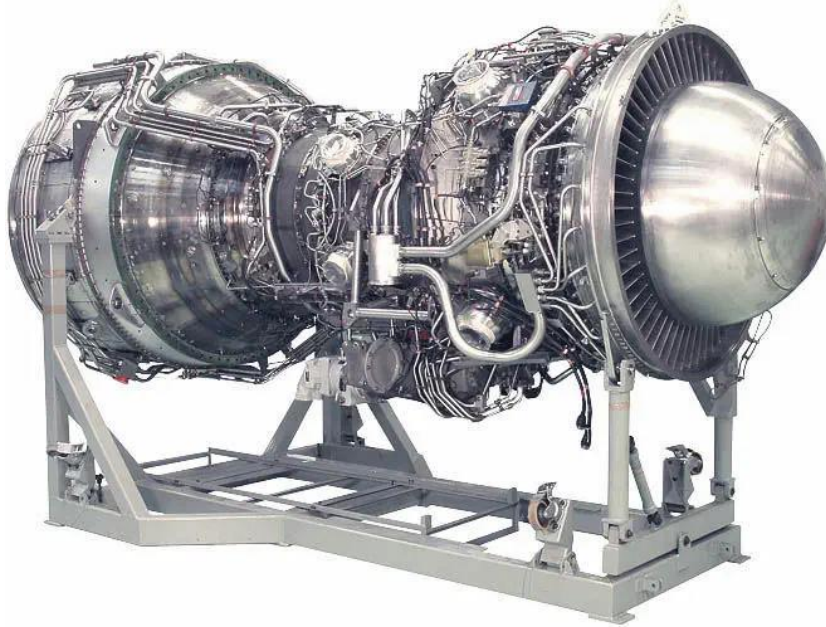
Όλα τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια το μικρότερο κόστος καυσίμου, μικρότερο κόστος συντήρησης και τη μεγαλύτερη αξιοπιστία της εγκατάστασης. (Ζάννης, 2020-2021)

2.2.3 Αεριοστρόβιλοι

Οι αεριοστρόβιλοι είναι θερμικές μηχανές εσωτερικής καύσης με διαφορετική όμως λειτουργία από τις εμβολοφόρες ΜΕΚ. Ενώ στις εμβολοφόρες ΜΕΚ οι φάσεις λειτουργίας επαναλαμβάνονται κυκλικά εντός συγκεκριμένου χώρου, του κυλίνδρου, στους αεριοστρόβιλους οι διαφορετικές λειτουργίες πραγματοποιούνται ταυτόχρονα, αλλά σε διαφορετικά τμήματα της μηχανής, καθώς το εργαζόμενο μέσο περνά διαδοχικά από το ένα τμήμα στο επόμενο. Τα κύρια τμήματα που απαρτίζουν έναν αεριοστρόβιλο είναι ο συμπίεστής, ο θάλαμος καύσεως και ο στρόβιλος. Ο συμπίεστής και ο στρόβιλος συνδέονται με μία ή περισσότερες ατράκτους, που μεταδίδουν την κίνηση από τον στρόβιλο στον συμπίεστή. Οι ναυτικοί αεριοστρόβιλοι αποτελούν προσαρμογή κινητήρων αεροπλάνων σε ναυτικές εγκαταστάσεις. Η προσαρμογή αυτή επετεύχθη με την προσθήκη του στρόβιλου ισχύος, μετά τον στρόβιλο, για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας των



καυσαερίων και στην προστασία των υλικών από τις διαβρώσεις λόγω θαλάσσιου περιβάλλοντος. (Κλιάνης, et al., 2017)



Εικόνα 3. Ναυτικός αεριοστρόβιλος της Rolls-Royce (MT30). (Από το Διαδίκτυο)



3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι προωστήριες μηχανές των πλοίων συνήθως κατασκευάζονται κατόπιν ειδικής παραγγελίας, ώστε να προσαρμόζονται στο μέγεθος και στις επικρατέστερες ταχύτητες του πλοίου, όπως η μέγιστη και η οικονομική ταχύτητα πλεύσεως τους. Με το συνδυασμό των διαφορετικών τύπων κινητήρων (αεριοστρόβιλοι, πετρελαιοκινητήρες, πυρηνικοί αντιδραστήρες) γίνεται προσπάθεια εκμεταλλεύσεως των πλεονεκτημάτων του εκάστοτε τύπου μηχανής, σε διαφορετικές περιοχές λειτουργίας και απαιτήσεις ισχύος. Οι αεριοστρόβιλοι εμφανίζουν υψηλή απόδοση σε πλήρες φορτίο, όμως σε μερικό φορτίο εμφανίζουν χαμηλό βαθμό αποδόσεως, με συνέπεια να έχουν χαμηλότερο βαθμό αποδόσεως από τους πετρελαιοκινητήρες. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε πολεμικά πλοία και ειδικές εφαρμογές όπου είναι σύνηθες φαινόμενο η απαίτηση για υψηλές ταχύτητες (boost) και μικρότερο όγκο μηχανοστασίου. Αντιθέτως οι πετρελαιοκινητήρες εμφανίζουν υψηλό βαθμό απόδοσης σε όλο το εύρος στροφών τους, συνεπώς είναι οικονομικότεροι από τους αεριοστρόβιλους, αλλά για δεδομένη ισχύ εμφανίζουν μεγάλο όγκο και βάρος. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εμπορικά πλοία όπου ζητούμενο είναι το χαμηλότερο κόστος. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες εμφανίζουν πρακτικά απεριόριστη αυτονομία, αλλά με μεγάλο βάρος, κόστος και επικινδυνότητα, ενώ η εφαρμογή τους περιορίζεται σε πολεμικά πλοία ειδικής κατηγορίας (αεροπλανοφόρα) και παγοθραυστικά. Οι διαφορετικού τύπου μηχανές μπορούν να συνδυασθούν είτε με μηχανική σύζευξη (μειωτήρες στροφών) είτε με ηλεκτρική σύζευξη (ηλεκτρική πρόωση). Για την περιγραφή των διαφόρων συνδυασμένων συστημάτων προώσεως ακολουθείται διεθνώς συγκεκριμένη ονοματολογία. Αρχικά τοποθετείται το πρόθεμα CO από τον αγγλικό όρο Combined (συνδυασμένο). Ακολουθεί ένα γράμμα, που αντιστοιχεί στο είδος της προώσεως που χρησιμοποιείται για την οικονομική ταχύτητα πλεύσεως (D=Diesel-πετρελαιοκινητήρας, G=Gas turbine-αεριοστρόβιλος, N=Nuclear-πυρηνικός αντιδραστήρας, S=Steam turbine-ατμοστρόβιλος). Ύστερα ακολουθεί το γράμμα που δείχνει εάν η λειτουργία των συνδυασμένων συστημάτων είναι ταυτόχρονη ή όχι (A=And-και, O=Or-ή). Μετά ακολουθεί το γράμμα



που υποδεικνύει ποιο είδος συστήματος πρόωσης χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσεως (D,G,N,S). (Κλιάνης, et al., 2018)³

Στο τέλος, εάν υπάρχει διαγώνια σύνδεση των συστημάτων πρόωσης με τους απέναντι ελικοφόρους άξονες τότε τοποθετείται το γράμμα X. Τα κυριότερα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι :

1. Με ένα τύπο μηχανών: CODAD, COGAG, CONAN.
2. Με δύο τύπους μηχανών: CODOG, CODAG, COGAS, CONAS, CONAG, COSAG.
3. Με διαγώνια σύνδεση μηχανών: CODOGX, CODAGX, CODADX, COGAGX, COGAGX-DX.

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ - COMBINED DIESEL AND DIESEL (CODAD)

Το CODAD είναι ένα σύστημα πρόωσης πλοίων επιφανείας, στο οποίο δύο πετρελαιοκινητήρες παρέχουν την απαραίτητη ισχύ πρόωσης για κάθε ελικοφόρο άξονα, μέσω μειωτήρα και κατάλληλων συμπλεκτών. Το ζεύγος των πετρελαιοκινητήρων μπορεί να είναι ίδιας ή και διαφορετικής ισχύος. Με αυτό το τρόπο μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι μικρής ισχύος πετρελαιοκινητήρες για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης ή οι μεγάλης ισχύος πετρελαιοκινητήρες για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσης ή ο οποιοσδήποτε μεταξύ τους συνδυασμός. Η συνήθης διάταξη στις φρεγάτες είναι η τοποθέτηση του κάθε ζεύγος πετρελαιοκινητήρων μαζί με τον μειωτήρα σε ξεχωριστό διαμέρισμα του σκάφους. Οι δε ελικοφόροι άξονες φέρουν έλικες μεταβλητού βήματος (CPPs), δίνοντας την δυνατότητα στο σκάφος να επιτυγχάνει ταχύτητες πλεύσης άνω των 30 κόμβων. (Κλιάνης, et al., 2018)

Το σύστημα αυτό παρουσιάζει τα παρακάτω θετικά στοιχεία:

- οικονομική λειτουργία σε όλες τις ταχύτητες

³ Κλιάνης, Λ. Χ., Νικολός, Ι. Κ. & Σιδέρης, Ι. Α., 2018. *Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως*. Β' Έκδοση επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.



- υψηλή αξιοπιστία
- απλή λειτουργία και οικονομική συντήρηση λόγω της ύπαρξης ίδιων πετρελαιοκινητήρων με καλό καταμερισμού του φορτίου (engine load).



Εικόνα 4. Διάταξη συστήματος CODAD με δύο ζεύγη όμοιων πετρελαιοκινητήρων που κινούν δύο έλικες σε μορφή U-Arrangement και T-Arrangement. (Ohmayer, 2012)

3.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Οι αεριοστροβίλοι συγκριτικά με τους πετρελαιοκινητήρες προσφέρουν μερικά σημαντικά πλεονεκτήματα, όσον αφορά την πρόωση στα πλοία, αλλά και μερικά σημαντικά μειονεκτήματα.

Τα πλεονεκτήματα είναι:

1. Υψηλός λόγος ισχύος-προς-βάρος (ειδική ισχύς), δηλαδή μεγάλη ισχύς από κινητήρα με μικρό όγκο και βάρος.
2. Ταχεία εκκίνηση χωρίς ανάγκη προθερμάνσεως και απόδοση της μέγιστης ισχύος σε ελάχιστο χρονικό διάστημα.
3. Αθόρυβη και χωρίς κραδασμούς λειτουργία.
4. Μειωμένη ανάγκη συντηρήσεως και ευκολία αντικαταστάσεως του κινητήρα.
5. Μειωμένη εκπομπή καπνού.



Τα μειονεκτήματα είναι:

1. Χαμηλός βαθμός απόδοσης με συνέπεια την υψηλή κατανάλωση καυσίμου και τη μειωμένη αυτονομία του πλοίου.
2. Αδυναμία καύσεως πετρελαίου χαμηλής ποιότητας.
3. Ανάγκη χρησιμοποίησης πολύπλοκων και ακριβών συστημάτων μειώσεως των στροφών, αφού η ταχύτητα περιστροφής τους είναι ιδιαίτερα υψηλή.
4. Ανάγκη χρησιμοποίησης ελίκων μεταβλητού βήματος (CPPς) ή μειωτήρα με αναστροφή, αφού οι αεριοστρόβιλοι δεν είναι αναστρεφόμενες μηχανές.
5. Μεγάλος όγκος οχετών αναρροφήσεως και οχετών καυσαερίων.

Επομένως ο συνδυασμός αεριοστροβίλων και πετρελαιοκινητήρων επιτρέπει την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων και των δύο ειδών μηχανών, σε διαφορετικές όμως συνθήκες και περιοχές λειτουργίας. Γι' αυτό το λόγο οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων (ή ταχεία εκκίνηση) ενώ οι πετρελαιοκινητήρες για την πλεύση με οικονομική ταχύτητα, επιτυγχάνοντας οικονομία καυσίμου και μέγιστη αυτονομία. (Κλιάνης, et al., 2018)

Στη συνέχεια παραθέτονται τα κυριότερα συνδυασμένα συστήματα πρόωσης με χρήση πετρελαιοκινητήρων και αεριοστροβίλων.

3.3.1 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED DIESEL AND GAS (CODAG)

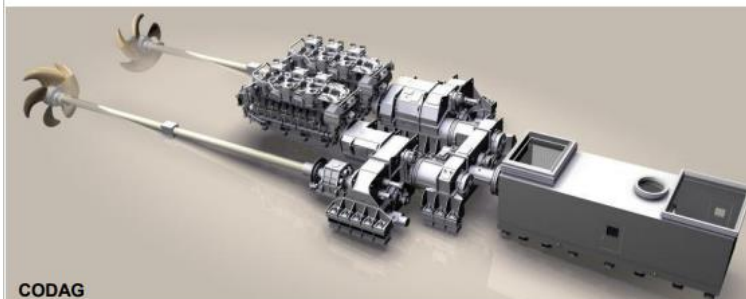
Το CODAG είναι ένα σύστημα που συνδυάζει πετρελαιοκινητήρες με αεριοστρόβιλους. Για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης οι πετρελαιοκινητήρες κινούν μέσω μειωτήρα την αντίστοιχη έλικα. Για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσης απαραίτητη είναι και η συμβολή των αεριοστροβίλων, οι οποίοι συνδέονται με το σύστημα των πετρελαιοκινητήρων μέσω δικούς τους μειωτήρα. Τα δύο ανεξάρτητα συστήματα αξόνων φέρουν έλικες μεταβλητού βήματος (CPPs).

Σύμφωνα με τα παραπάνω διακρίνουμε τέσσερις τρόπους λειτουργίας του συστήματος:

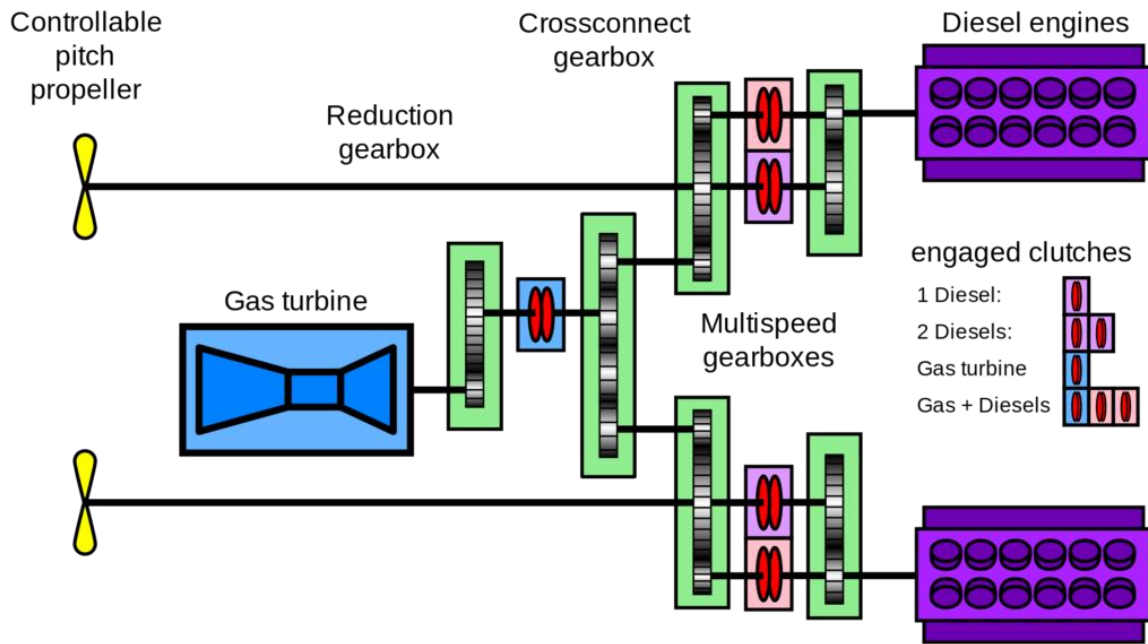


*Παναγιώτης - Φανούρης Αρμάος,
“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”*

1. Κίνηση των δύο CPPs με την λειτουργία μόνο του ενός πετρελαιοκινητήρα-(Diesel engine mode).
2. Λειτουργία των δύο πετρελαιοκινητήρων για την κίνηση των δύο CPPs. Κάθε έλικα κινείται από έναν πετρελαιοκινητήρα, ανεξάρτητα από την δεύτερη έλικα. Με αυτόν τον τρόπο κάθε έλικα μπορεί να λειτουργεί σε διαφορετικό αριθμό στροφών δίνοντας στο πλοίο υψηλή ικανότητα ελιγμών.
3. Κίνηση των δύο CPPs με τη χρήση μόνο του αεριοστρόβιλου-(Gas Turbine mode). Η ταχύτητα περιστροφής των δύο ελίκων είναι αναγκαστικά η ίδια, ενώ οι ελιγμοί πραγματοποιούνται με την βοήθεια του μεταβλητού βήματος της κάθε έλικας. Ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί στην περιοχή βέλτιστης αποδόσεως και όχι στην περιοχή μεγίστων στροφών.
4. Εμπλοκή αεριοστρόβιλου και πετρελαιοκινητήρων για την επίτευξη της μέγιστης ταχύτητας του πλοίου (CODAG mode). (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 5. Συνδυασμένο σύστημα πρόωσης CODAG. (Ohmayer, 2012)



Εικόνα 6. Συνδυασμός δύο ομοίων πετρελαιοκινητήρων και ενός αεριοστροβίλου σε διάταξη CODAG, για την κίνηση δύο ελίκων. (Από το διαδίκτυο)

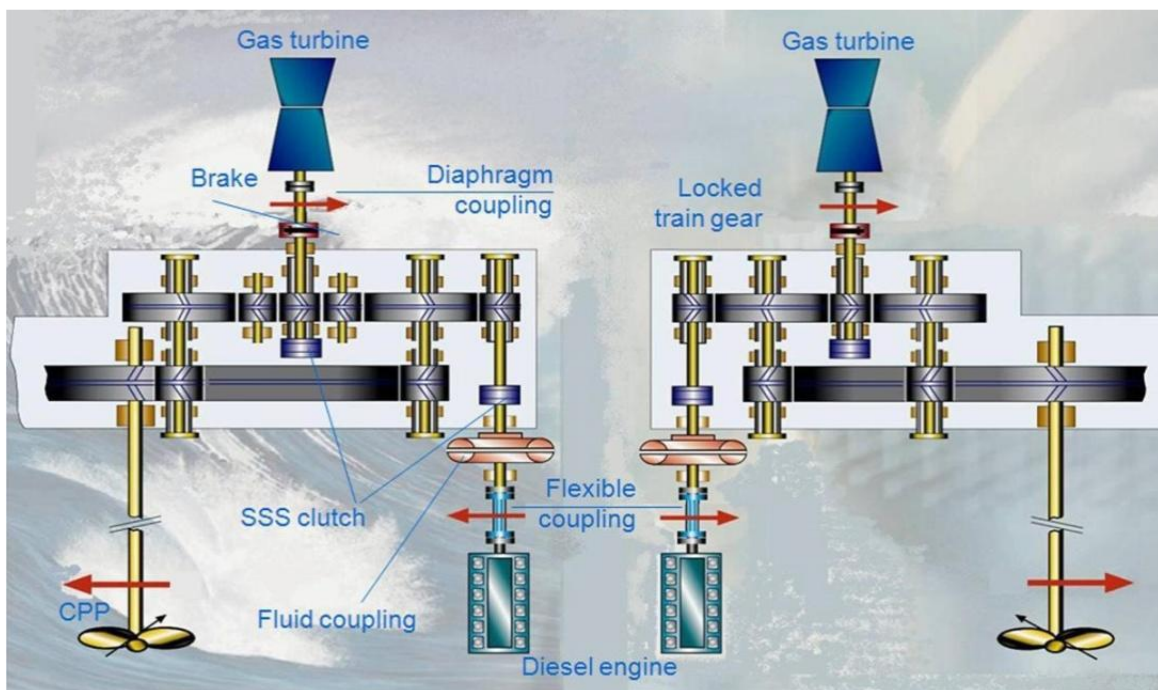
3.3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ Η ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED DIESEL OR GAS (CODOG)



Εικόνα 7. Συνδυασμένο σύστημα πρόωσης CODOG. (Ohmayer, 2012).



Το CODOG είναι ένα σύστημα που συνδυάζει πετρελαιοκινητήρες με αεριοστρόβιλους όπως το σύστημα CODAG με την διαφορά ότι οι πετρελαιοκινητήρες χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα από τους αεριοστρόβιλους. Για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι πετρελαιοκινητήρες. Για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά οι αεριοστρόβιλοι, γεγονός που απαιτεί την εγκατάσταση μεγαλύτερης ισχύος αεριοστρόβιλων που συνεπάγεται αυξημένο μέγεθος μηχανοστασίου, μεγαλύτερο βάρος εγκατάστασης και αυξημένο κόστος συνολικής εγκατάστασης αλλά και χρήσης. Από την άλλη πλευρά τα συστήματα των μειωτήρων είναι απλούστερα, φθηνότερα, μικρότερου όγκου και βάρους και παράγουν λιγότερο θόρυβο. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 8. Συνδυασμός δύο όμοιων πετρελαιοκινητήρων και δύο όμοιων αεριοστρόβιλων σε διάταξη CODOG, για την κίνηση δύο ελίκων μεταβλητού βήματος. (Από το διαδίκτυο)

3.3.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ - COMBINED DIESEL-ELECTRIC AND GAS (CODLAG)

Το CODLAG είναι ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης όπου, για χαμηλες ταχύτητες πλεύσης, οι ελικοφόροι άξονες παίρνουν κίνηση απευθείας από ηλεκτροκινητήρες χωρίς τη χρήση



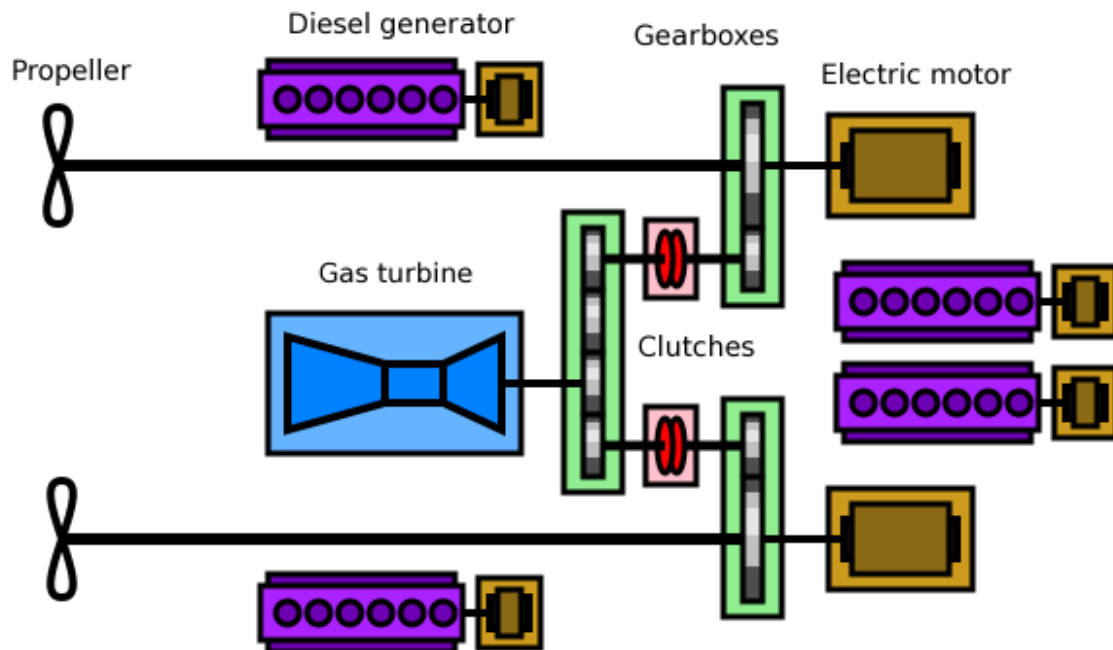
μειωτήρα. Οι ηλεκτροκινητήρες τροφοδοτούνται με ρεύμα που παράγεται από συστήματα ηλεκτρογεννητριών με θερμικούς κινητήρες (Diesel gensets). Για την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων πλεύσης απαιτείται και η χρήση αεριοστροβίλου ο οποίος συνδέεται με τους ηλεκτροκινητήρες μέσω μειωτήρα.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του συνδυασμένου συστήματος πρόωσης είναι:

- δεν απαιτούνται ξεχωριστά (H/Z) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες του πλοίου
- η δυνατότητα πλεύσης σε χαμηλές ταχύτητες, χωρίς να υπάρχει μείωση της απόδοσης των πετρελαιοκινητήρων, καθόσον αυτοί περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα
- η χαμηλή στάθμη θορύβου της ηλεκτροπρόωσης. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 9. Συνδυασμένο σύστημα πρόωσης CODELAG. (Ohmayer, 2012).



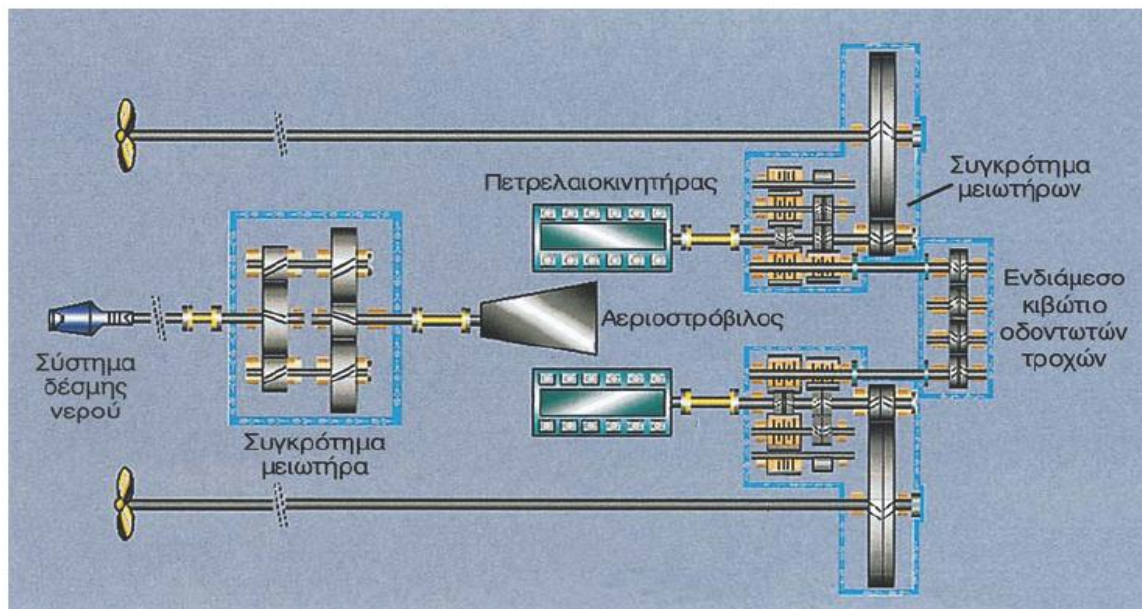
Εικόνα 10. Συνδυασμός τεσσάρων ομοίων πετρελαιοκινητήρων (ηλεκτροπαραγωγών ζευγών) και ενός αεριοστροβίλου σε διάταξη CODLAG, για την κίνηση δύο ελίκων. (Από το διαδίκτυο)

3.3.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΕΛΙΚΩΝ ΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΔΕΣΜΗΣ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΑΠΟ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟ – COMBINED DIESEL AND GAS - WATER JET AND REFINED PROPELLER

Το CODAG-WARP αποτελείται από δύο πετρελαιοκινητήρες με τους αντίστοιχους μειωτήρες τους, όπου ο καθένας δίνει κίνηση σε έναν ελικοφόρο άξονα με έλικα μεταβλητού βήματος (CPP). Ταυτόχρονα οι δύο μειωτήρες συνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας ενδιάμεσης διάταξης οδοντωτών τροχών, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα κίνησης και των δύο ελικοφόρων αξόνων με τη χρήση μόνο ενός εκ των δύο πετρελαιοκινητήρων. Σε αυτήν την περίπτωση οι ελικοφόροι άξονες περιστρέφονται με ίδια ταχύτητα αλλά με αντίθετη φορά. Οι μειωτήρες αυτοί έχουν βαθμίδες μείωσης στροφών για την βέλτιστη διανομή των φορτίων. Επιπλέον το σύστημα διαθέτει μία ανεξάρτητη διάταξη αεριοστροβίλου, ο οποίος μέσω του δικού του μειωτήρα κινεί ένα σύστημα δέσμης νερού (water jet) και είναι τοποθετημένο κατά μήκος της αξονικής γραμμής (Central line) του σκάφους, μεταξύ των δύο ελικοφόρων αξόνων. Στο σύστημα αυτό οι πετρελαιοκινητήρες και ο αεριοστροβίλος είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και δίνουν ισχύ σε διαφορετικές κινητήριες διατάξεις, οπότε μπορούν να λειτουργούν είτε ταυτόχρονα είτε αυτοτελώς, επιτυγχάνοντας αρκετούς συνδυασμούς ισχύος. Η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να επιτύχει ταχύτητα 30 και



περισσότερων κόμβων. Για να γίνει αυτό, εκκινεί ο αεριοστρόβιλος και η ισχύς προώσεως δίνεται τόσο από τις έλικες όσο και από τη δέσμη νερού. Ένα παράδειγμα που βρίσκει το συγκεκριμένο σύστημα εφαρμογή είναι στις φρεγάτες τύπου Freedom (LCS-1, Littoral Combat Ship) του Αμερικάνικου Πολεμικού Ναυτικού. Στα πλοία αυτού του τύπου συνδυάζονται δύο αεριοστρόβιλοι με δύο πετρελαιοκινητήρες, που δίνουν κίνηση σε τέσσερα συστήματα water jet. Η συνδυασμένη χρήση όλων των κινητήρων επιτυγχάνει μέγιστη ταχύτητα 47 κόμβων για πλοίο εκτοπίσματος 3000 τόνων. Γενικά σε χαμηλές ταχύτητες η απόδοση του water jet είναι μικρότερη σε σύγκριση με αυτή των ελίκων και γι' αυτό το λόγο το water jet χρησιμοποιείται μόνο για την επίτευξη των υψηλών ταχυτήτων. Στο σύστημα αυτό οι άξονες και οι έλικες έχουν μικρότερες διαστάσεις από τις συνηθισμένες εξαιτίας της μικρότερης μεταφερόμενης ισχύος μόνο από τους πετρελαιοκινητήρες. Επομένως οι έλικες μπορούν να βελτιστοποιηθούν για χαμηλή ακουστικότητα αφού δεν έχουν να μεταφέρουν το κανονικό φορτίο των ελίκων που είναι περίπου 15 με 20MW για κάθε μία. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η υψηλή ικανότητα επιβίωσης του σε περίπτωση απώλειας μίας εκ των δύο ελίκων ή σε περίπτωση που υποστεί εκτεταμένες ζημιές στο μέσον του σκάφους από εχθρική επίθεση. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 11. Διάταξη CODAG-WARP δύο όμοιων πετρελαιοκινητήρων που δίνουν κίνηση σε δύο έλικες μέσω μειωτήρων και ενός αεριοστρόβιλου που παρέχει ισχύ σε σύστημα δέσμης νερού. (Κλιάνης, et al., 2018)

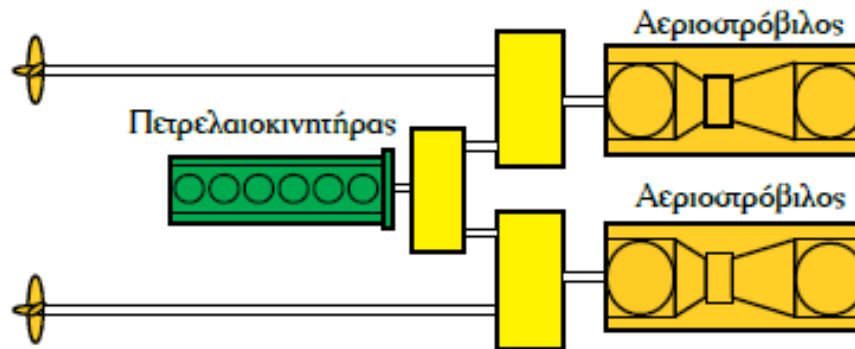


3.3.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CODOGX & CODAGX

Σε αυτά τα συστήματα πρόωσης έχουμε τη χρήση ενός πετρελαιοκινητήρα και ένας αεριοστροβίλου, οι οποίοι κινούν 2 ελικοφόρους άξονες με κατάλληλους μειωτήρες. Στο CODOGX ο πετρελαιοκινητήρας δουλεύει για την επίτευξη των χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης ενώ ο αεριοστροβίλος βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσης εμπλέκεται ο αεριοστροβίλος και αποσυμπλέκεται ο πετρελαιοκινητήρας. Στο CODAGX ο πετρελαιοκινητήρας και ο αεριοστροβίλος δουλεύουν συνδυαστικά για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσης. Το συγκεκριμένο σύστημα προορίζεται για σκάφη μικρού εκτοπίσματος και μεγάλης ταχύτητας, όπως τα ταχύπλοα περιπολικά σκάφη. Όμως εμφανίζει μικρή ευελιξία, μεγάλο βάρος μειωτήρων και υψηλές μηχανικές απώλειες στους μειωτήρες. (Κλιάνης, et al., 2018)

3.3.6 ΣΥΣΤΗΜΑ COGAGX-DX

Στο COGAGX-DX χρησιμοποιούνται δύο αεριοστροβίλοι, συνδεδεμένοι μέσω μειωτήρα, για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσεως και ένας πετρελαιοκινητήρας για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων. Ο μοναδικός πετρελαιοκινητήρας κινεί και τις δύο έλικες, οπότε αυτές περιστρέφονται αναγκαστικά με την ίδια ταχύτητα στις χαμηλές στροφές, ενώ ο πετρελαιοκινητήρας έχει να διαχειριστεί περισσότερα φορτία σε σχέση με το σύστημα CODAG. Στην περίπτωση που θέλουμε να επιτύχουμε υψηλότερες ταχύτητες τότε λειτουργεί ταυτόχρονα ο πετρελαιοκινητήρας και ένας από τους δύο αεριοστροβίλους. Μόνο στην επίτευξη της μέγιστης ταχύτητας πλεύσεως του πλοίου λειτουργούν ταυτόχρονα ο πετρελαιοκινητήρας μαζί με τους δύο αεριοστροβίλους. Αναγκαστικά η ταχύτητα περιστροφής των δύο ελίκων είναι η ίδια, λόγω της παρουσίας του ενδιάμεσου μειωτήρα. Μειονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα και βάρος των μειωτήρων, ενώ αντίστοιχα αυξημένες είναι και οι μηχανικές απώλειες στους μειωτήρες. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 12. Διάταξη COGAGX-DX που συνδυάζει έναν πετρελαιοκινητήρα και δύο αεριοστρόβιλους για την κίνηση δύο ελίκων. (Κλιάνης, et al., 2018)

3.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Τα πλεονεκτήματα των αεριοστρόβιλων όσον αφορά στην πρόωση πολεμικών πλοίων είναι τα ακόλουθα:

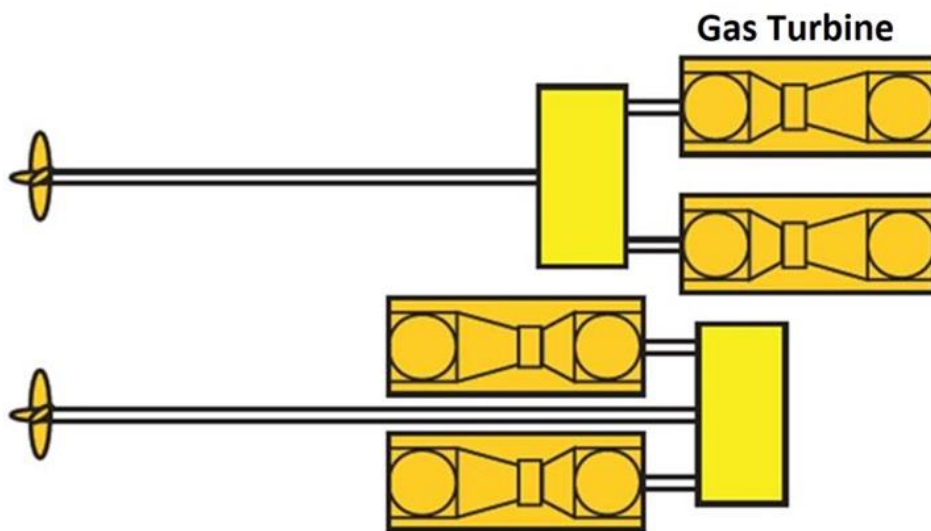
- Η μεγάλη πυκνότητα ισχύος (υψηλός λόγος ισχύος προς όγκο)
- Η αθόρυβη και χωρίς κραδασμούς λειτουργία
- Η απρόσκοπτη λειτουργία για μεγάλα χρονικά διαστήματα
- Η ταχύτατη αντικατάστασής τους
- Η ευκολία εκκινήσεως και η απόδοση της μέγιστης ισχύος σε μικρό χρονικό διάστημα

Γενικά λόγω του μικρού μεγέθους των αεριοστρόβιλων για δεδομένη ισχύ, προτιμάται η τοποθέτησή τους στα μεγάλα πλοία αναψυχής όπου ο χώρος είναι πολύτιμος και η στάθμη θορύβου αποτελεί ουσιαστικό κριτήριο επιλογής προωστήριου συστήματος. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των αεριοστρόβιλων είναι η επίτευξη πολύ χαμηλού επιπέδου καπνού στα καυσαέρια, αποτέλεσμα της μεγάλης περίσσειας αέρα κατά την καύση. Επομένως παρατηρούμε ότι παρόλο του χαμηλότερου βαθμού αποδόσεως σε σχέση με τους πετρελαιοκινητήρες υπάρχει αγορά για συστήματα προώσεως αποκλειστικά με την χρήση αεριοστρόβιλων. Στη συνέχεια παραθέτονται τα συστήματα συνδυασμού των αεριοστρόβιλων. (Κλιάνης, et al., 2018)



3.4.1 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED GAS AND GAS (COGAG)

Το COGAG είναι ένας τύπος συστήματος πρόωσης για πλοία που χρησιμοποιούν δύο αεριοστρόβιλους συνδεδεμένους μέσω μειωτήρα και συμπλέκτη για κάθε ελικοφόρο άξονα. Το κάθε σύστημα μπορεί να φέρει αεριοστρόβιλους διαφορετικής ισχύος για επίτευξη χαμηλών ή υψηλών ταχυτήτων πλεύσης με την αντίστοιχη οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου, είτε ίδιας ισχύος για την ομοιογένεια του συστήματος και τη μείωση του κόστους συντήρησης. Η συνήθης κατάσταση λειτουργίας του συστήματος απαιτεί τη χρήση ενός αεριοστρόβιλου μόνο, για κάθε ελικοφόρο άξονα. Σε αυτήν την περίπτωση, για την επίτευξη ομοιόμορφης φθοράς των αεριοστρόβιλων, εφαρμόζεται η εναλλάξ λειτουργία τους βάσει συγκεκριμένου προγράμματος. Η μη δυνατότητα αναστροφής της περιστροφής των αεριοστρόβιλων απαιτεί τη χρήση ελίκων μεταβλητού βήματος (CPPς). Παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος αυτού είναι η κλάση φρεγατών τύπου STANDARD του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 13. Συνδυασμός τεσσάρων όμοιων αεριοστρόβιλων σε διάταξη COGAG για την κίνηση δύο ελίκων. (Κλιάνης, et al., 2018)

3.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ INTEGRATED GAS TURBINE ELECTRIC (IGTE)

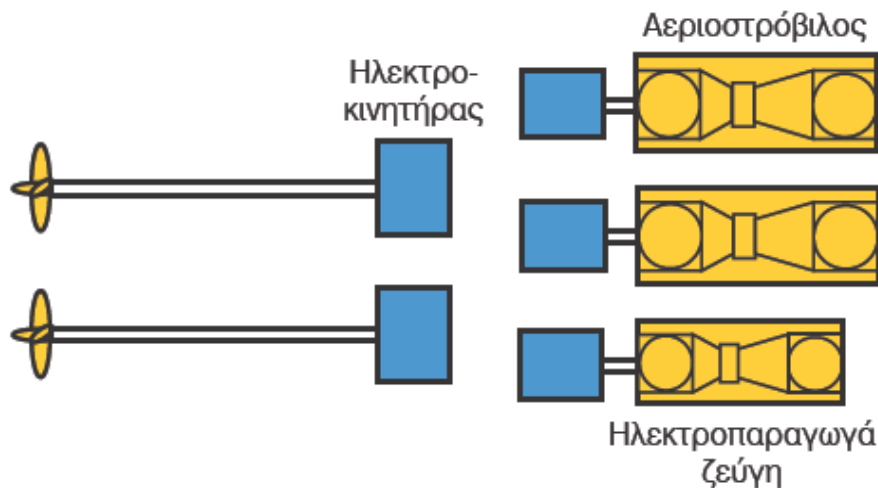
Το Integrated Gas Turbine Electric (IGTE) αποτελεί την εξέλιξη του συνδυασμένου συστήματος COGAG όπου ο κάθε αεριοστρόβιλος είναι τμήμα Ηλεκτροπαραγωγού



ζεύγους (H/Z) και η πρόωση του πλοίου γίνεται από ηλεκτροκινητήρες. Πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι:

- η μη συγκέντρωση όλων των (H/Z) σε ένα μεγάλο κεντρικό μηχανοστάσιο αλλά η τοποθέτησής τους σε διάφορα σημεία του σκάφους
- η μη απαίτηση εγκατάστασης επιπλέον (H/Z) για τις ανάγκες ηλεκτροδότησης του πλοίου
- ο χαμηλός θόρυβος λειτουργίας του συστήματος λόγω της απουσίας μειωτήρων.

Αυτό το σύστημα βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε πλοία αναψυχής που παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, έχουν απαιτήσεις χαμηλών επιπέδων θορύβου και μικρότερου μεγέθους μηχανοστασίου καθώς επίσης και χαμηλών εκπομπών ρύπων. (Κλιάνης, et al., 2018)



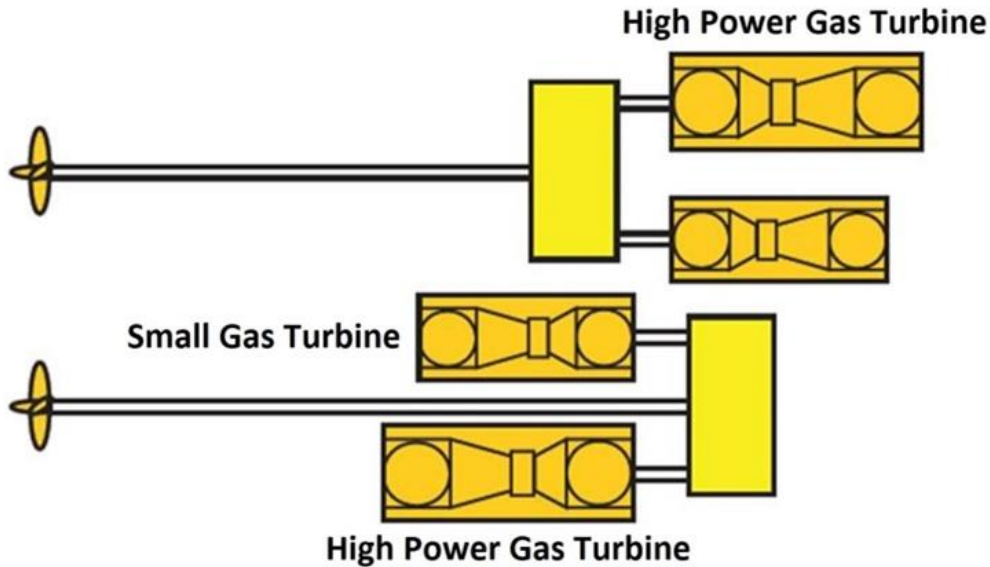
Εικόνα 14. Συνδυασμός δύο ομοίων και ενός μικρότερου αεριοστροβίλου για την κίνηση δύο ελίκων, με τη χρήση πλήρους ηλεκτρικής πρόωσης (IGTE). (Κλιάνης, et al., 2018)

3.4.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ Η ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED GAS OR GAS (COGOG)

Το COGOG είναι ένας τύπος συστήματος πρόωσης για πλοία που χρησιμοποιούν δύο αεριοστροβίλους διαφορετικής ισχύος συνδεδεμένους μέσω μειωτήρα και συμπλέκτη για κάθε ελικοφόρο άξονα. Για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο αεριοστροβίλος χαμηλής ισχύος ενώ για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων χρησιμοποιείται αποκλειστικά ο αεριοστροβίλος υψηλής ισχύος, γεγονός που απαιτεί την ύπαρξη ενός μεγαλύτερου μηχανοστασίου με υψηλότερο κόστος εγκατάστασης. Το COGOG παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από το σύστημα COGAG γιατί οι



εκάστοτε αεριοστρόβιλοι, αναλόγως της ταχύτητας πλεύσης, λειτουργούν σε υψηλό φορτίο. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 15. Συνδυασμός ενός μεγαλύτερης ισχύος αεριοστρόβιλου με έναν μικρότερης ισχύος σε διάταξη (COGOG) για την κίνηση μίας προπέλας. (Roumeliotis, et al., 2018)

3.4.4 ΣΥΣΤΗΜΑ COGAGX

Στο σύστημα αυτό δύο ή τρεις αεριοστρόβιλοι συνδέονται διαγώνια, ώστε να κινούν δύο ελικοφόρους άξονες. Το επί πλέον σύστημα μειωτήρων που συνδέει τους δύο ελικοφόρους άξονες προσθέτει βάρος, όγκο και κόστος στην κατασκευή, ενώ αυξάνονται οι μηχανικές απώλειες. Όμως επιτρέπει καλύτερο συνδυασμό των αεριοστροβίλων και περισσότερες επιλογές ισχύος, με λιγότερους κινητήρες σε σχέση με τα κλασικά συστήματα COGAG. (Κλιάνης, et al., 2018)

3.5 ΑΛΛΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ

Εκτός των παραπάνω συνδυασμένων συστημάτων υπάρχουν και άλλα τα οποία συνδυάζουν αεριοστροβίλους με ατμοστροβίλους καθώς και με πυρηνικούς αντιδραστήρες και είναι τα εξής:

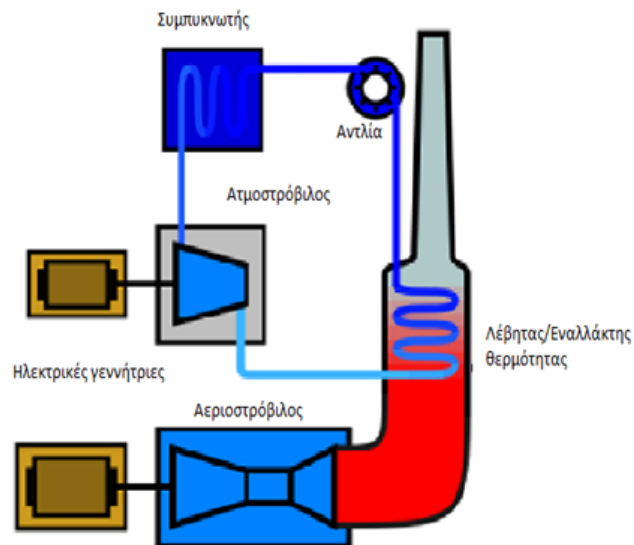


3.5.1 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED GAS AND STEAM (COGAS)

Το COGAS είναι ένας τύπος συστήματος πρόωσης για πλοία που αποτελείται από συνδυασμό αεριοστρόβιλων με ατμοστρόβιλο. Στο σύστημα αυτό υπάρχει λέβητας ο οποίος εκμεταλλεύεται τα θερμά καυσαέρια των αεριοστρόβιλων για την θέρμανση νερού προς παραγωγή ατμού και χρήση του από τον ατμοστρόβιλο. Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης, ενώ ο ατμοστρόβιλος για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων. Ο παραγόμενος ατμός από τον λέβητα χρησιμοποιείται και για την κάλυψη άλλων αναγκών του πλοίου. Γενικά ο συνολικός βαθμός αποδόσεως της εγκατάστασης αυτής είναι αυξημένος λόγω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των καυσαερίων των αεριοστρόβιλων. (Κλιάνης, et al., 2018)

3.5.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΩΣΗΣ - COMBINED GAS ELECTRIC STEAM (COGES)

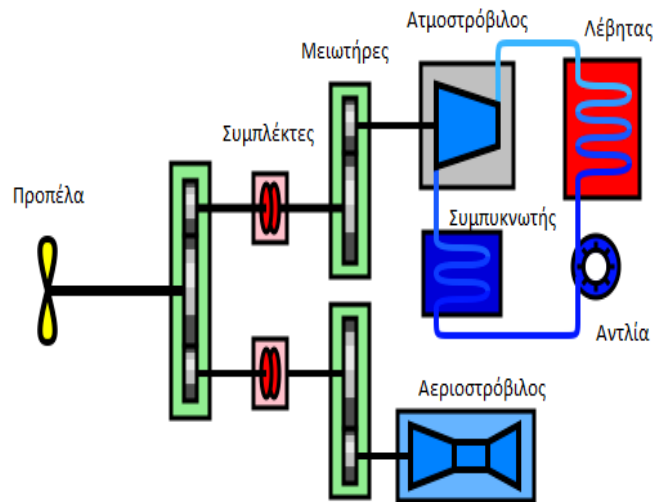
Το συνδυασμένο σύστημα πρόωσης COGES αποτελεί μία παραλλαγή του συστήματος COGAS, στο οποίο οι αεριοστρόβιλοι και ο ατμοστρόβιλος χρησιμοποιούνται ως (H/Z) για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος για την πρόωση του πλοίου μέσω ηλεκτροκινητήρων και την ηλεκτροδότησή του. Το σύστημα αυτό βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλα σύγχρονα πλοία αναψυχής, λόγω υψηλών αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 16. Σκαριφηματική διάταξη συστήματος πρόωσης COGES. (Από το διαδίκτυο)

3.5.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED STEAM AND GAS (COSAG)

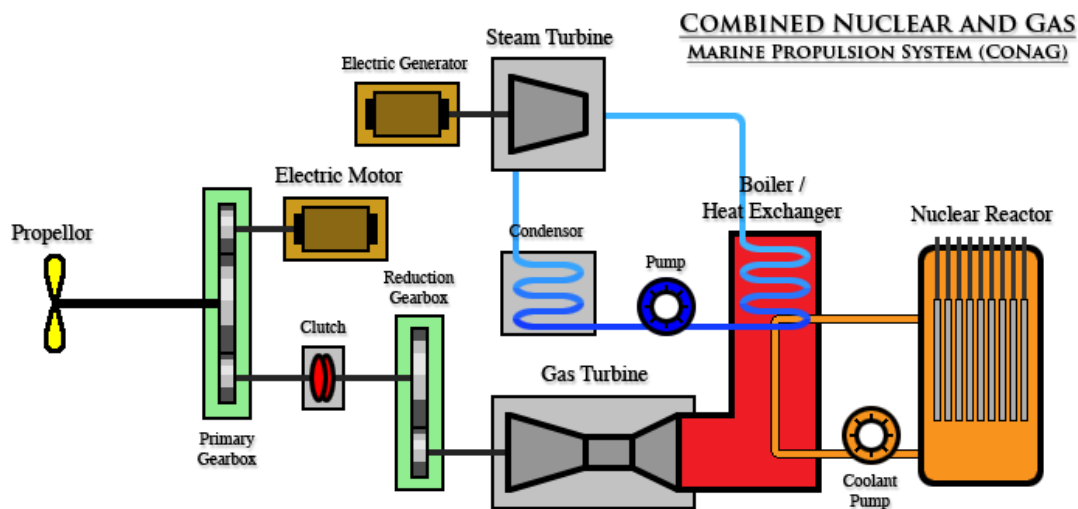
Το COSAG είναι ένα σύστημα πρόωσης που χρησιμοποιούταν παλαιότερα και κατά το οποίο το σύστημα λεβήτων και ατμοστρόβιλου χρησιμοποιούταν για την επίτευξη των οικονομικών ταχυτήτων πλεύσης. Για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων πλεύσης απαιτούνταν και η χρήση του αεριοστρόβιλου. Η παραγωγή ατμού γινόταν με την εκμετάλλευση των καυσαερίων του αεριοστρόβιλου όπως και στο σύστημα COGAS. Το σύστημα αυτό εγκαταλείφθηκε λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους του καθώς και του χαμηλού βαθμού αποδόσής του. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 17. Σκαριφηματική διάταξη συστήματος πρόωσης COSAG. (Από το διαδίκτυο)

3.5.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED NUCLEAR AND GAS (CONAG)

Το σύστημα CONAG διαθέτει έναν πυρηνικό αντιδραστήρα για την παραγωγή ατμού και την τροφοδότηση του ατμοστρόβιλου για την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης ενώ για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων το σύστημα επικουρείται και από αεριοστρόβιλους. Το πλεονέκτημα του συστήματος αυτού σε σχέση με την χρήση αποκλειστικά της πρόωσης με πυρηνική ενέργεια, είναι το μικρότερο μέγεθος και το κόστος εγκαταστάσεως, καθώς και η διατήρηση της μεγάλης αυτονομίας, καθόσον οι μέγιστες ταχύτητες απαιτούνται σε μικρό ποσοστό του χρόνου πλεύσεως. (Κλιάνης, et al., 2018)



Εικόνα 18. Σκαριφηματική διάταξη συστήματος πρόωσης CONAG. (Από το διαδίκτυο)



3.5.5 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ - COMBINED NUCLEAR AND STEAM (CONAS)

Στο σύστημα CONAS χρησιμοποιείται πυρηνικός αντιδραστήρας για την επίτευξη οικονομικών ταχυτήτων πλεύσεως, ενώ για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων παρέχεται επί πλέον ατμός στον ατμοστρόβιλο από ανεξάρτητο λέβητα καυσίμου. Το σύστημα αυτό εφαρμόστηκε στη Ρωσική κλάση καταδρομικών κατευθυνόμενων βλημάτων Κίρον. (Κλιάνης, et al., 2018)

3.5.6 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ ΤΥΠΟΥ CODLAD (COMBINED DIESEL ELECTRIC AND DIESEL) ΚΑΙ CODLOD (COMBINED DIESEL ELECTRIC OR DIESEL)

Στα συστήματα υβριδικής προώσεως συνυπάρχουν η μηχανική με την ηλεκτρική μεταφορά ισχύος προς τις έλικες. Η μηχανική ισχύς παρέχεται κατευθείαν στις έλικες από τους πετρελαιοκινητήρες, ενώ συνυπάρχει και η μετάδοση κινήσεως προς τις έλικες από τους ηλεκτροκινητήρες που λαμβάνουν ηλεκτρική ισχύ από ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη. Το σύστημα αυτό παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία και είναι καλύτερα προετοιμασμένο για μεταβολές στη λειτουργία του κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού ή κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες οι οποίες είναι:

- Σε εκείνα όπου ο πετρελαιοκινητήρας και ο ηλεκτροκινητήρας ταυτόχρονα παρέχουν ισχύ στην έλικα και ονομάζονται CODLAD.
- Σε εκείνα όπου είτε ο πετρελαιοκινητήρας είτε ο ηλεκτροκινητήρας παρέχουν ισχύ για την κίνηση της έλικας και ονομάζονται CODLOD.

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι τα εξής:

1. Μεγάλη διαθέσιμη ποικιλία διαφορετικών μορφών προώσεως ώστε να επιλέγεται πάντα η κατάλληλη.
2. Αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος προώσεως αφού η έλικα μπορεί να κινείται είτε αποκλειστικά από τον πετρελαιοκινητήρα είτε από τον ηλεκτροκινητήρα.
3. Μειωμένο κόστος λειτουργίας από την στιγμή που υπάρχει η δυνατότητα οι κύριες μηχανές και οι ηλεκτροκινητήρες να λειτουργούν στο βέλτιστο εύρος λειτουργίας τους, με κατάλληλο συνδυασμό μηχανών για να παρέχεται η αναγκαία ισχύς προώσεως.



*Παναγιώτης - Φανούρης Αρμάος,
“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”*

4. Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων σε μεγάλο εύρος φορτίων και διαφορετικών μορφών προώσεως.
5. Μείωση του χρόνου όπου οι πετρελαιοκινητήρες λειτουργούν μακριά από την βέλτιστη περιοχή λειτουργίας τους.
6. Μειωμένος θόρυβος λειτουργίας εξαιτίας της χρήσης ηλεκτροκινητήρων για την κίνηση των ελίκων.
7. Οι ηλεκτροκινητήρες μπορούν να λειτουργούν ως ηλεκτρογεννήτριες, παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ για τις καταναλώσεις του πλοίου, κινούμενες από τις κύριες μηχανές. (Κλιάνης, et al., 2018)



4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΦΡΕΓΑΤΑΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΩΣΗΣ - ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ



Εικόνα 19. Φρεγάτα τύπου Belharra. (Από το Διαδίκτυο)

4.1 ΠΡΟΦΙΛ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ

Στην παρούσα εργασία θεωρούμε την αποστολή ενός πλοίου επιφανείας τύπου φρεγάτας (Φ/Γ) με εκτόπισμα 5.200 τόνους (t) η οποία θα διανύσει απόσταση 5.000 ναυτικών μιλίων (nmi). Η συγκεκριμένη Φ/Γ πραγματοποιεί την αποστολή των 5.000 nmi κινούμενη με ένα συγκεκριμένο προφίλ ταχυτήτων. Το προφίλ ταχυτήτων που θεωρήθηκε στην παρούσα εργασία βασίζεται στην πλεύση της Φ/Γ με ταχύτητα 18 κόμβων (knots=nmi/h) για ποσοστό του συνολικού χρόνου αποστολής ίσο με 75% (high patrol speed), με ταχύτητα 24 κόμβων για ποσοστό του συνολικού χρόνου αποστολής ίσο με 20% (transit speed) και με ταχύτητα 29 κόμβων για ποσοστό του συνολικού χρόνου ίσο με 5% (sprint speed). Η κατανομή των προαναφερθέντων ταχυτήτων πλεύσης (high patrol, transit and sprint speed) ως ποσοστά του συνολικού χρόνου αποστολής εικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα.

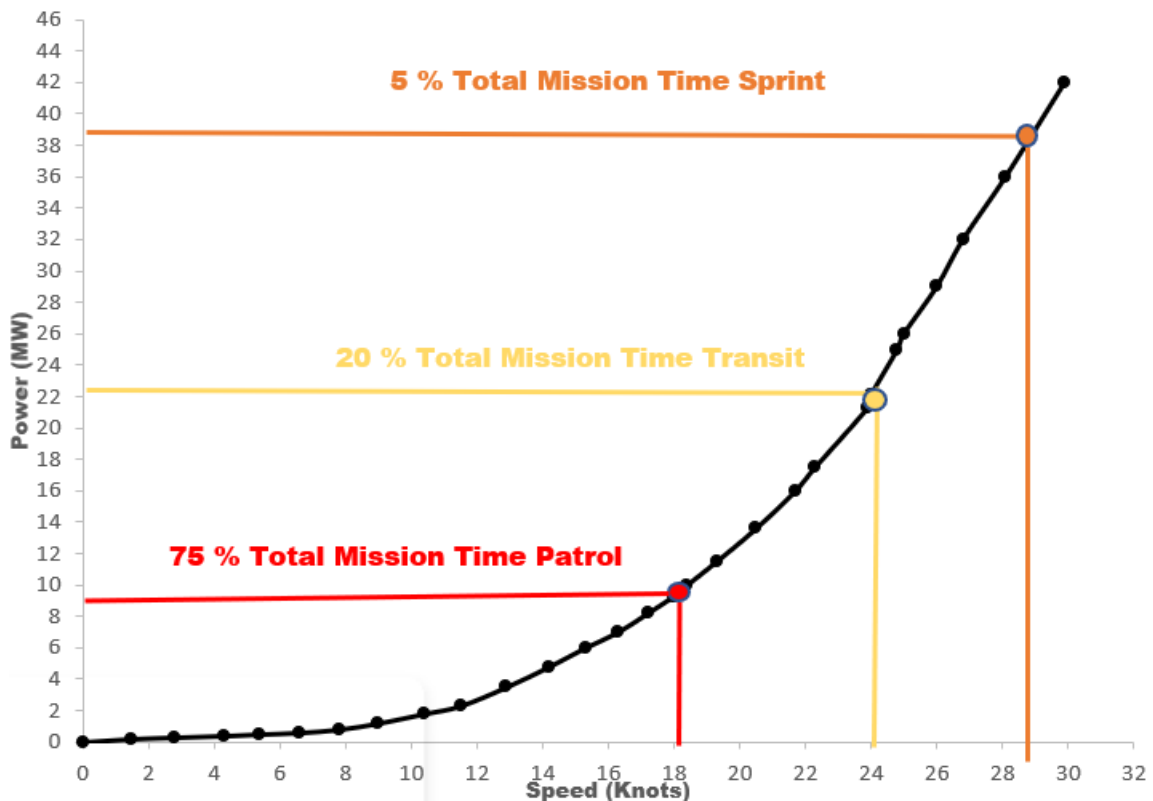


Σχήμα 1. Κατανομή ταχυτήτων φρεγάτας εκτοπίσματος 5.200 τόνων.

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται η καμπύλη αντίστασης της υπό εξέτασης Φ/Γ στην οποία φαίνεται η μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος πλεύσης από την Φ/Γ συναρτήσει της ταχύτητα της Φ/Γ σε κόμβους. Όπως αναμενόταν η καμπύλη αντίστασης είναι εκθετικής μορφής το οποίο δηλώνει ότι για συγκεκριμένη μεταβολή της ταχύτητας της Φ/Γ έχουμε εκθετική αύξηση της απαιτούμενης ισχύος πλεύσης.



5200 tons Frigate Resistance Power Curve



Σχήμα 2. Απαιτούμενη ισχύς για 5.200 τόνους φρεγάτα σε σχέση με την ταχύτητα (Roumeliotis, et al., 2018).⁴

Έχοντας υπόψη την προαναφερθείσα κατανομή ταχυτήτων πλεύσης της Φ/Γ με την μορφή ποσοστών επί του συνολικού χρόνου αποστολής και την καμπύλη αντίστασης της Φ/Γ μπορούμε για κάθε ταχύτητα πλεύσης εκ των τριών θεωρηθέντων να υπολογίσουμε από την καμπύλη αντίστασης την απαιτούμενη ισχύ πλεύσης. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1. Κατανομή ταχυτήτων και του αντίστοιχου χρόνου χρήσης ως ποσοστό (%) του συνολικά απαιτηθέντος χρόνου και της αντίστοιχης συνολικής απαιτούμενης ισχύος (kW).

Προφίλ Ταχύτητας	Ταχύτητα (Knots)	% του συνολικού χρόνου αποστολής	Απαιτούμενη ισχύς (MW)
High patrol	18	75	9.3
Transit	24	20	22.1
Sprint	29	5	39

⁴ Roumeliotis, I. και συν., 2018. *Comparative Assessment of Various Combined Propulsion Systems through a Frigate Mission Analysis*. s.l., Hellenic Naval Academy & University of Nicosia.



Στη συνέχεια θα θεωρήσουμε ότι η εξεταζόμενη Φ/Γ είναι εξοπλισμένη με δύο διαφορετικά συνδυασμένα συστήματα πρόωσης:

1. Σύστημα CODAD
2. Σύστημα CODLAG

4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ CODAD

Το προωστήριο σύστημα της Φ/Γ αποτελείται από τέσσερις πετρελαιοκινητήρες Wartsila 16V31 έκαστος ονομαστικής ισχύος 9.760 kW ειδικής καταναλώσεως καυσίμου (SFOC) ίσης με 170,1 g/kWh (ISO conditions) σε διάταξη συνδυασμού (CODAD). Ο πετρελαιοκινητήρας Wartsila 16V31 είναι τετράχρονος, στρόβιλο-υπερπληρωμένος, άμεσης έγχυσης με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα. Διαθέτει 16 κυλίνδρους ήτοι 610 kW ανά κύλινδρο στις 750 στροφές ανά λεπτό. Ο συγκεκριμένος κινητήρα έχει διάμετρο κυλίνδρου 310 mm, διαδρομή εμβόλου 430 mm, 4 βαλβίδες ανά κύλινδρο και το βάρος του είναι 92,5 τόνοι (Wartsila, 2022). Ο συγκεκριμένος πετρελαιοκινητήρας παρουσιάζει την μικρότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου (μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου) σε σχέση με οποιαδήποτε άλλο τετράχρονο ναυτικό πετρελαιοκινητήρα. Ταυτόχρονα διατηρεί εξαιρετικές επιδόσεις σε ολόκληρο το εύρος λειτουργίας. Ο αρθρωτός σχεδιασμός του επιτρέπει τη σημαντική μείωση του χρόνου συντήρησης και του κόστους, βελτιώνοντας έτσι τη διαθεσιμότητα ισχύος και μειώνοντας την ανάγκη ανταλλακτικών.



Εικόνα 20. Πετρελαιοκινητήρας Wärtsilä 31. (Από το διαδίκτυο)



Η απαίτηση ισχύος πλεύσης σε κάθε ταχύτητα πλεύσης της Φ/Γ θα καλύπτεται ως εξής:

- Στην περίπτωση που η Φ/Γ κινείται με ταχύτητα 18 κόμβων (high patrol) θα χρησιμοποιεί δύο (έναν σε κάθε ελικοφόρο άξονα) από τους τέσσερις πετρελαιοκινητήρες Wartsila 16V31 που έχει. Η μέγιστη ισχύς του καθενός είναι 9.760 kW και η απαίτηση ισχύος σε αυτή την ταχύτητα πλεύσης είναι 9.300 kW οπότε θα λειτουργούν και οι δυο στο 50% του φορτίου τους, δηλαδή $9.760 \text{ kW} * 0,50 = 4.880 \text{ kW}$ έκαστος. Επομένως με αυτόν τον τρόπο οι δύο πετρελαιοκινητήρες Wartsila 16V31 υπερκαλύπτουν την μέγιστη απαίτηση ισχύος.
- Στην περίπτωση που η Φ/Γ κινείται με ταχύτητα 24 κόμβων (transit patrol) θα χρησιμοποιεί και τους τέσσερις πετρελαιοκινητήρες Wartsila 16V31 που έχει. Η μέγιστη ισχύς τους είναι $4 * 9.760 \text{ kW} = 39.040 \text{ kW}$ και η απαίτηση ισχύος σε αυτή την ταχύτητα πλεύσης είναι 22.100 kW. Επομένως και οι τέσσερις πετρελαιοκινητήρες Wartsila 16V31 θα λειτουργούν στο 57% του φορτίου τους ($9.760 \text{ kW} * 0,57 = 5.563,2 \text{ kW}$ έκαστος) έτσι ώστε να υπερκαλύπτουν αποδοτικά την μέγιστη απαίτηση ισχύος.
- Στην περίπτωση που η Φ/Γ κινείται με ταχύτητα 29 κόμβων (sprint patrol) θα χρησιμοποιεί και πάλι τέσσερις πετρελαιοκινητήρες Wartsila 16V31. Η μέγιστη ισχύς τους είναι $4 * 9.760 \text{ kW} = 39.040 \text{ kW}$ και η απαίτηση ισχύος σε αυτή την ταχύτητα πλεύσης είναι 39.000 kW. Επομένως οι τέσσερις πετρελαιοκινητήρες Wartsila 16V31 υπερκαλύπτουν την μέγιστη απαίτηση ισχύος όταν θα είναι περίπου στο 100% του φορτίου τους.

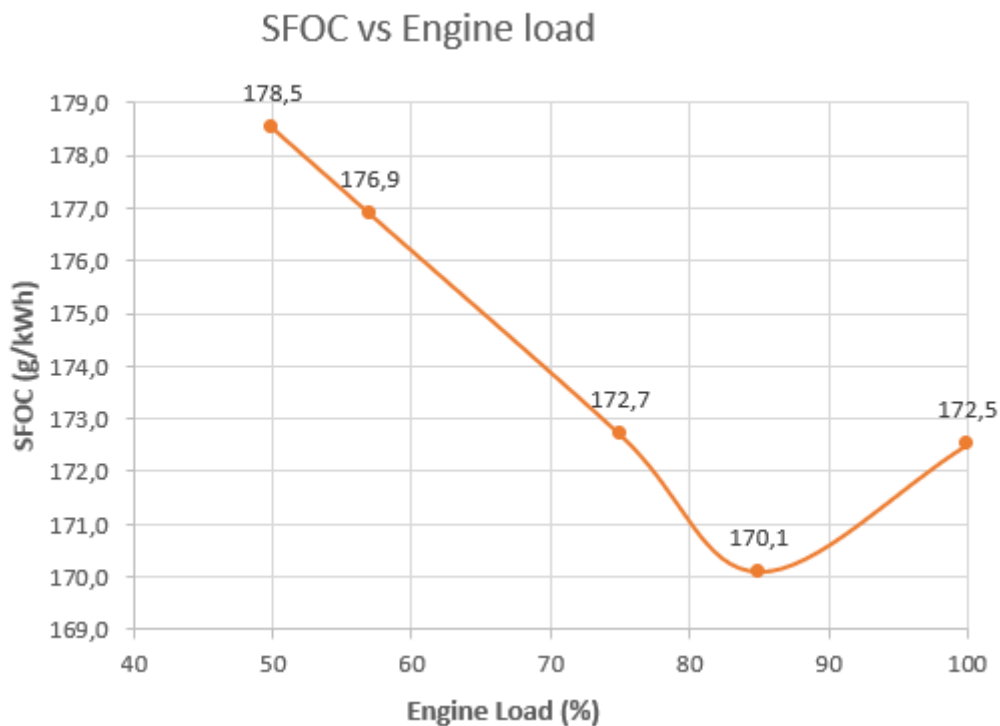
Στο ακόλουθο γράφημα παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) σε συνάρτηση με το ποσοστό φορτίου του πετρελαιοκινητήρα (engine load %) Wartsila 16V31. Αυτό που προκύπτει από την παρατήρηση του γραφήματος είναι ότι ενώ αρχικά η (SFOC) είναι 178,5 g/kWh για 50% engine load, όσο αυξάνει το engine load παρατηρούμε μία μείωση της (SFOC) η οποία γίνεται ελάχιστη και ίση με 170,1 g/kWh για 85% engine load. Στη συνέχεια παρατηρούμε μία αύξηση της (SFOC) η οποία είναι ίση με 172,5 g/kWh στο 100% engine load αλλά και πάλι παραμένει μικρότερη από ότι ήταν αρχικά στο 50% engine load. Αυτό προκύπτει γιατί η αυξημένη τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου στα μερικά φορτία οφείλεται στο ότι η θερμική ενέργεια των καυσαερίων πριν τον στρόβιλο της υπερπλήρωσης δεν είναι επαρκής ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή παραγωγή έργου



εκτόνωσης στον στρόβιλο του υπερπληρωτή με αποτέλεσμα τις χαμηλές στροφές του άξονα του υπερπληρωτή και τις χαμηλές τιμές του λόγου συμπίεσης στον συμπιεστή της υπερπλήρωσης. Χαμηλές τιμές της πίεσης υπερπλήρωσης αέρα έχουν ως αποτέλεσμα την τροφοδοσία των κυλίνδρων με μη ικανοποιητική ποσότητα αέρα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την σχετική αυξημένη κατανάλωση καυσίμου για επίτευξη συγκεκριμένης ισχύος. Στη συνέχεια που αυξάνεται η θερμική ενέργεια των καυσαερίων έχουμε αύξηση της πίεσης υπερπλήρωσης αέρα (αύξηση της παροχής αέρα προς τους κυλίνδρους) και έτσι μείωση της καταναλισκόμενης ποσότητας καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. Στην μέγιστη ισχύ έχουμε μικρή επιδείνωση της ειδικής κατανάλωσης σε σχέση με το 85% του φορτίου διότι πρέπει να αυξηθεί η εγχυόμενη ποσότητα καυσίμου για δεδομένη πίεση σαρώσεως ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση της μέγιστης ισχύος.

Πίνακας 2. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σε σχέση με το φορτίο (%) του πετρελαιοκινητήρα (engine load %) Wärtsilä 16V31 (Wartsila, 2022).

ENGINE LOAD (%)	(SFOC) (g/kWh)
50	178,5
57	176,6
75	172,7
85	170,1
100	172,5



Γράφημα 1. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σαν συνάρτηση του φορτίου του πετρελαιοκινητήρα (engine load %) Wärtsilä 16V31.

Στη συνέχεια θα περιγραφεί με αναλυτικό τρόπο η μεθοδολογία υπολογισμού της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου για αποστολή 5.000 ναυτικών μιλίων της υπό εξέτασης Φ/Γ εκτοπίσματος 5.200 τόνων για συνδυασμένο σύστημα CODAD.

Γνωρίζουμε ότι η συνολική διανυθείσα απόσταση των 5.000 ναυτικών μιλίων ήταν αποτέλεσμα των αντίστοιχων διανυθέντων αποστάσεων με τις αντίστοιχες ταχύτητες του προφίλ ταχυτήτων της φρεγάτας, δηλαδή

$[0,75 \cdot 18 \text{ nmi/h} + 0,2 \cdot 24 \text{ nmi/h} + 0,05 \cdot 29 \text{ nmi/h}] \cdot \text{απαιτούμενος χρόνος ταξιδιού σε ώρες (h)} = 5.000 \text{ nmi.}$

Από τον υπολογισμό των πράξεων της παραπάνω σχέσης βρίσκουμε τα ακόλουθα:

- Ο συνολικός χρόνος ταξιδιού είναι 253,16 ώρες.
- Ο χρόνος ταξιδιού με προφίλ ταχύτητας high patrol (18 knots) είναι 189,87 ώρες.
- Ο χρόνος ταξιδιού με προφίλ ταχύτητας transit patrol (24 knots) είναι 50,63 ώρες.
- Ο χρόνος ταξιδιού με προφίλ ταχύτητας sprint patrol (29 knots) είναι 12,66 ώρες.



Η κατανάλωση καυσίμου δίνεται συναρτήσει της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της ισχύος από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power (kW)$$

Επομένως έχουμε τις εξής περιπτώσεις:

4.2.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ HIGH PATROL (18 KNOTS)

Η απαιτούμενη ισχύς για ταχύτητα πλεύσης High patrol = 18 knots, όπως υπολογίστηκε παραπάνω είναι 9.300 kW. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη λειτουργία δύο κινητήρων Wartsila 16V31 με φορτίο 50%, καθώς έκαστος μπορεί να αποδώσει σε αυτό το φορτίο $9.760 \text{ kW} * 0,5 = 4.880 \text{ kW}$. Έτσι η συνολική ισχύς που θα παράγουν θα είναι $2 * 4.880 \text{ kW} = 9.760 \text{ kW}$, τιμή που υπερκαλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις ταξιδιού.

Από το γράφημα 1 (SFOC vs Engine load) του πετρελαιοκινητήρα Wartsila 16V31 βρίσκουμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για 50% φορτίο κινητήρα είναι $178,5 \text{ g/kWh}$, δηλαδή $0,1785 \text{ kg/kWh}$. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση, η ωριαία κατανάλωση προκύπτει:

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power (kW) \Rightarrow \dot{m}_f = 0,1785 \left(\frac{kg}{kWh} \right) * 9760 \text{ kW} \Rightarrow$$

$$\dot{m}_f = 1742,16 \text{ kg/h.}$$

Οπότε η κατανάλωση του πλοίου για χρόνο ταξιδιού 189,87 ώρες προκύπτει:

$$\text{Κατανάλωση ταξιδιού} = \text{ωριαία κατανάλωση (kg/h)} * \text{χρόνος ταξιδιού (h)} = 1742,16 \text{ kg/h} * 189,87 \text{ h} = 330783,92 \text{ kg} \Rightarrow \text{Κατανάλωση ταξιδιού} = 330,78 \text{ t.}$$

4.2.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ TRANSIT PATROL (24 KNOTS)

Η απαιτούμενη ισχύς για ταχύτητα πλεύσης Transit patrol = 24 knots, όπως υπολογίστηκε παραπάνω είναι 22.100 kW. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη λειτουργία τεσσάρων κινητήρων Wartsila 16V31 με φορτίο 57%, καθώς έκαστος μπορεί να αποδώσει σε αυτό το φορτίο $9.760 \text{ kW} * 0,57 = 5.563,2 \text{ kW}$. Έτσι η συνολική ισχύς που θα παράγουν θα είναι $4 * 5.563,2 \text{ kW} = 22.252,8 \text{ kW}$, τιμή που υπερκαλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις ταξιδιού.



Από το γράφημα 1 (SFOC vs Engine load) του πετρελαιοκινητήρα Wartsila 16V31 βρίσκουμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για 57% φορτίο κινητήρα είναι 176,9 g/kWh, δηλαδή 0,1769 kg/kWh. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση, η ωριαία κατανάλωση προκύπτει:

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power(kw) \Rightarrow \dot{m}_f = 0,1769 \left(\frac{kg}{kWh} \right) * 22.252,8 kw \Rightarrow$$

$$\dot{m}_f = 3.935,99 kg/h$$

Οπότε η κατανάλωση του πλοίου για χρόνο ταξιδιού 50,63 ώρες προκύπτει:

$$\text{Κατανάλωση ταξιδιού} = \text{ωριαία κατανάλωση (kg/h)} * \text{χρόνος ταξιδιού (h)} = 3.935,99 kg/h * 50,63 h = 199.278,98 kg \Rightarrow \text{Κατανάλωση ταξιδιού} = 199,28 t.$$

4.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ SPRINT PATROL (29 KNOTS)

Η απαιτούμενη ισχύς για ταχύτητα πλεύσης Sprint patrol = 29 knots, όπως υπολογίστηκε παραπάνω είναι 39.000 kW. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη λειτουργία τεσσάρων κινητήρων Wartsila 16V31 με φορτίο 100%, καθώς έκαστος μπορεί να αποδώσει σε αυτό το φορτίο 9.760 kW. Έτσι η συνολική ισχύς που θα παράγουν θα είναι $4 * 9.760 kW = 39.040 kW$, τιμή που υπερκαλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις ταξιδιού.

Από το γράφημα 1 (SFOC vs Engine load) του πετρελαιοκινητήρα Wartsila 16V31 βρίσκουμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για 100% φορτίο κινητήρα είναι 172,5 g/kWh, δηλαδή 0,1725kg/kWh. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση, η ωριαία κατανάλωση προκύπτει:

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power(kw) \Rightarrow \dot{m}_f = 0,1725 \left(\frac{kg}{kWh} \right) * 39.040kw \Rightarrow \dot{m}_f = 6.734,40$$

$$kg/h.$$

Οπότε η κατανάλωση του πλοίου για χρόνο ταξιδιού 12,66 ώρες προκύπτει:

$$\text{Κατανάλωση ταξιδιού} = \text{ωριαία κατανάλωση (kg/h)} * \text{χρόνος ταξιδιού (h)} = 6.734,40 kg/h * 12,66 h = 85.257,50kg \Rightarrow \text{Κατανάλωση ταξιδιού} = 85,26 t.$$

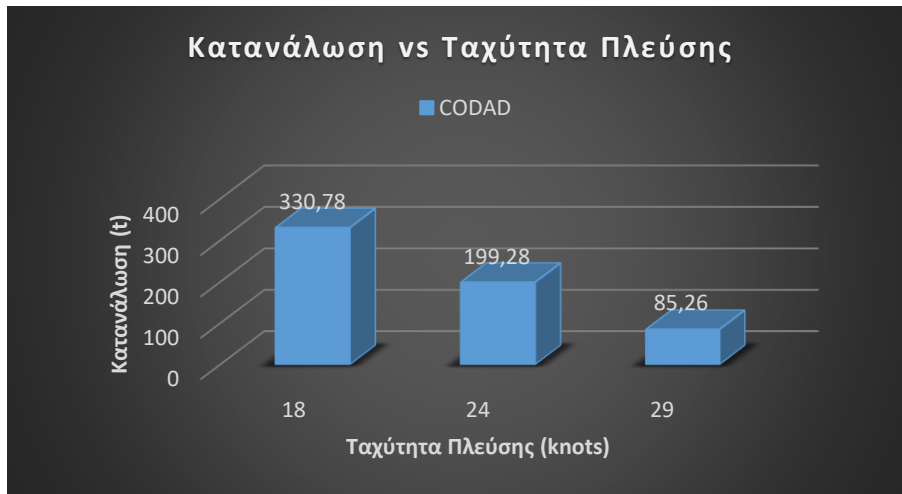
Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας που παρουσιάζει τη συνολική ποσότητα καυσίμου σε τόνους που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα και στην συνολική ποσότητα απαιτηθέντος καυσίμου για το ταξίδι των 5000 ναυτικών μιλίων.



Παναγιώτης - Φανούρης Αρμάος,
“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”

Πίνακας 3. Συνολική κατανάλωση καυσίμου σε τόνους (t) της φρεγάτας 5.200 τόνων (t) με συνδυασμένο σύστημα (CODAD) για αποστολή 5000 ναυτικών μιλίων (nmi).

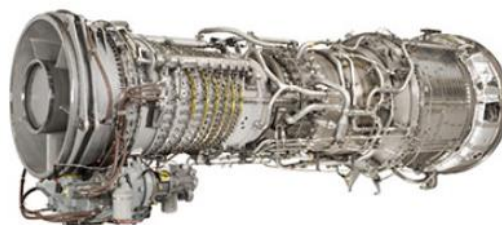
Τύπος πλεύσης	Ταχύτητα πλεύσης (knots)	Engine Load (%)	Fuel consumption (Kg/kWh)	Ισχύς εκάστου κινητήρα (kW)	Αριθμός κινητήρων που βρίσκονται σε λειτουργία	Συνολική ισχύς πλοίου (kW)	Χρόνος πλεύσης (h)	Κατανάλωση ανά ώρα πλεύσης (kg/h)	Κατανάλωση ταξιδιού (kg)	Κατανάλωση ταξιδιού (t)
High patrol	18	50	0,1785	4880	2	9760	189,87	1742,16	330783,92	330,78
Transit patrol	24	57	0,1769	5563,2	4	22252,8	50,63	3935,99	199278,98	199,28
Sprint patrol	29	100	0,1725	9760	4	39040	12,66	6734,40	85257,50	85,26
									ΣΥΝΟΛΙΚΗ	615,32



Γράφημα 2. Κατανάλωση καυσίμου φρεγάτας ανά ταχύτητα πλεύσης, με συνδυασμένο σύστημα CODAD.

4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ CODLAG

Το προωστήριο σύστημα της Φ/Γ αποτελείται από δύο (H/Z) Wartsila 8V31 έκαστο ονομαστικής ισχύος 4.685 kW ειδικής καταναλώσεως καυσίμου (SFOC) ίσης με 171 g/kWh (ISO conditions) και βάρους 90 τόνων. Το κάθε (H/Z) φέρει έναν πετρελαιοκινητήρα Wartsila 8V31 ο οποίος είναι τετράχρονος, στρόβιλο-υπερπληρωμένος, άμεσης έγχυσης με ενδιάμεσο ψυγείο αέρα. Διαθέτει 8 κυλίνδρους ήτοι 610 kW ανά κύλινδρο στις 750 στροφές ανά λεπτό. Ο συγκεκριμένος κινητήρας έχει διάμετρο κυλίνδρου 310 mm, διαδρομή εμβόλου 430 mm και 4 βαλβίδες ανά κύλινδρο (Wartsila, 2022). Ακόμη το προωστήριο σύστημα αποτελείται από έναν αεριοστρόβιλο ονομαστικής ισχύος 30.200 kW (General Electric LM 2500+) ειδικής καταναλώσεως καυσίμου (SFOC) ίσης με 215 g/kWh (ISO conditions) και βάρους 5,237 τόνων. (General Electric, 2022)



Εικόνα 21. Αεριοστρόβιλος GE LM2500+. (Από το διαδίκτυο)



Η απαίτηση ισχύος πλεύσης σε κάθε ταχύτητα πλεύσης της Φ/Γ θα καλύπτεται ως εξής:

- Στην περίπτωση που η Φ/Γ κινείται με ταχύτητα 18 κόμβων (high patrol) θα χρησιμοποιεί και τα δύο (H/Z) Wartsila 8V31 που έχει. Η μέγιστη ισχύς τους είναι $2 * 4.685 \text{ kW} = 9.370 \text{ kW}$ και η απαίτηση ισχύος σε αυτή την ταχύτητα πλεύσης είναι 9.300 kW . Επομένως και τα δύο (H/Z) Wartsila 8V31 θα λειτουργούν στο 100% του φορτίου τους έτσι ώστε να υπερκαλύπτουν αποδοτικά την μέγιστη απαίτηση ισχύος.
- Στην περίπτωση που η Φ/Γ κινείται με ταχύτητα 24 κόμβων (transit patrol) θα χρησιμοποιεί τον έναν αεριοστρόβιλο GE LM2500+ που έχει. Η μέγιστη ισχύς του είναι 30.200 kW και η απαίτηση ισχύος σε αυτή την ταχύτητα πλεύσης είναι 22.100 kW . Επομένως επιλέγουμε πλεύση σε αυτή την περίπτωση με έναν αεριοστρόβιλο ώστε αυτός να λειτουργεί κοντά στο 75% ($22.100 \text{ kW} / 30.200 \text{ kW}$) της μέγιστης ισχύος.
- Στην περίπτωση που η Φ/Γ κινείται με ταχύτητα 29 κόμβων (sprint patrol) θα χρησιμοποιεί και τα δύο (H/Z) Wartsila 8V31 σε συνδυασμό με τον αεριοστρόβιλο GE LM2500+ που έχει. Η μέγιστη ισχύς τους είναι $(2 * 4.685 \text{ kW}) + 30.200 \text{ kW} = 9.370 \text{ kW} + 30.200 \text{ kW} = 39.570 \text{ kW}$ και η απαίτηση ισχύος σε αυτή την ταχύτητα πλεύσης είναι 39.000 kW . Επομένως ο παραπάνω συνδυασμός των συστημάτων υπερκαλύπτει την μέγιστη απαίτηση ισχύος όταν θα είναι περίπου στο 100% του φορτίου τους.

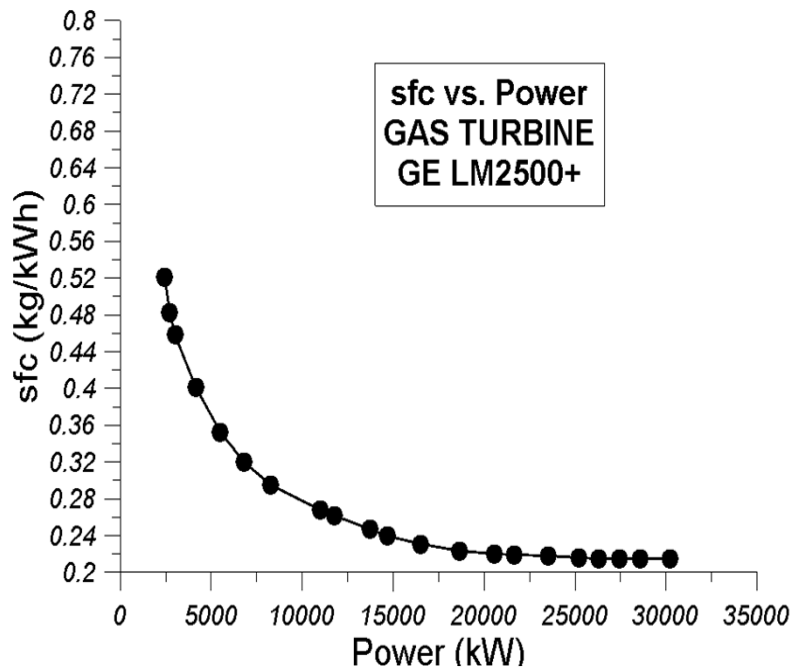
Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) σε συνάρτηση με το ποσοστό φορτίου του (H/Z) (engine load %) Wartsila 8V31.

Πίνακας 4. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σε σχέση με το φορτίο (%) του (H/Z) (engine load %) Wärtsilä 8V31. (Wartsila, 2022)

ENGINE LOAD (%)	(SFOC) (g/kWh)
50	182,3
75	173,4
85	171
100	172,5



Και στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) σε συνάρτηση με το ποσοστό φορτίου του αεριοστροβίλου (engine load %) GE LM2500+.



Γράφημα 3. Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC kg/kWh) σαν συνάρτηση του φορτίου του αεριοστροβίλου (engine load %) GE LM2500+. (Roumeliotis, et al., 2018)

Στη συνέχεια θα περιγραφεί με αναλυτικό τρόπο η μεθοδολογία υπολογισμού της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου για αποστολή 5.000 ναυτικών μιλίων της υπό εξέτασης Φ/Γ εκτοπίσματος 5.200 τόνων για συνδυασμένο σύστημα CODLAG.

4.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ HIGH PATROL (18KNOTS)

Η απαιτούμενη ισχύς για ταχύτητα πλεύσης High patrol = 18 knots, όπως υπολογίστηκε παραπάνω είναι 9.300 kW. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη λειτουργία δύο (H/Z) Wartsila 8V31 με πλήρη φορτίο, καθώς έκαστος μπορεί να αποδώσει 4.685 kW. Έτσι η συνολική ισχύς που θα παράγουν θα είναι $2 * 4.685 \text{ kW} = 9.370 \text{ kW}$, τιμή που υπερκαλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις ταξιδιού.

Από τον πίνακα 4 (SFOC vs Engine load) του (H/Z) Wartsila 8V31 βρίσκουμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για πλήρες φορτίο κινητήρα είναι 172,5 g/kWh, δηλαδή



0,1725kg/kWh. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση, η ωριαία κατανάλωση προκύπτει:

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power(kw) \Rightarrow \dot{m}_f = 0,1725 \left(\frac{kg}{kWh} \right) * 9370kw \Rightarrow$$

$$\dot{m}_f = 1616,325kg/h.$$

Οπότε η κατανάλωση του πλοίου για χρόνο ταξιδιού 189,87 ώρες προκύπτει:

$$\text{Κατανάλωση ταξιδιού} = \text{ωριαία κατανάλωση (kg/h)} * \text{χρόνος ταξιδιού (h)} = 1616,325 \text{ kg/h} * 189,87 \text{ h} = 306.891,63kg \Rightarrow \text{Κατανάλωση ταξιδιού} = 306,89 \text{ t.}$$

4.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ TRANSIT PATROL (24KNOTS)

Η απαιτούμενη ισχύς για ταχύτητα πλεύσης Transit patrol = 24 knots, όπως υπολογίστηκε παραπάνω είναι 22.100 kW. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη λειτουργία ενός αεριοστροβίλου GE LM2500+ με φορτίο 75%, τιμή που υπερκαλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις ταξιδιού.

Από το γράφημα 3 (SFOC vs Engine load) του αεριοστροβίλου βρίσκουμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για την ισχύ των 22.650 kW που αντιστοιχεί στο 75% του φορτίου του είναι 215 g/kWh, δηλαδή 0,215kg/kWh. Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση, η ωριαία κατανάλωση προκύπτει:

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power(kw) \Rightarrow \dot{m}_f = 0,215 \left(\frac{kg}{kWh} \right) * 22.650kw \Rightarrow$$

$$\dot{m}_f = 4.869,75kg/h.$$

Οπότε η κατανάλωση του πλοίου για χρόνο ταξιδιού 50,63 ώρες προκύπτει:

$$\text{Κατανάλωση ταξιδιού} = \text{ωριαία κατανάλωση (kg/h)} * \text{χρόνος ταξιδιού (h)} = 4.689,75 \text{ kg/h} * 50,63 \text{ h} = 246.555,4425kg \Rightarrow \text{Κατανάλωση ταξιδιού} = 246,56 \text{ t.}$$

4.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΕΥΣΗΣ SPRINT PATROL (29 KNOTS)

Η απαιτούμενη ισχύς για ταχύτητα πλεύσης Sprint patrol = 29 knots, όπως υπολογίστηκε παραπάνω είναι 39.000 kW. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη λειτουργία δύο (H/Z) Wartsila 8V31 σε συνδυασμό με τον αεριοστροβίλο GE LM2500+. Η μέγιστη ισχύς τους είναι (2 *



4.685 kW) + 30.200 kW = 9.370 kW + 30.200 kW = 39.570 kW και η απαίτηση ισχύος σε αυτή την ταχύτητα πλεύσης είναι 39.000 kW. Επομένως ο παραπάνω συνδυασμός των συστημάτων υπερκαλύπτει την μέγιστη απαίτηση ισχύος όταν θα είναι περίπου στο 100% του φορτίου τους.

Από τον πίνακα 4 (SFOC vs Engine load) του (H/Z) Wartsila 8V31 βρίσκουμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για 100% φορτίο είναι 172,5 g/kWh, δηλαδή 0,1725kg/kWh.

Από το γράφημα 3 (SFOC vs Engine load) του αεριοστροβίλου βρίσκουμε ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου για φορτίο 100% είναι 215 g/kWh, δηλαδή 0,215kg/kWh.

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω σχέση, η ωριαία κατανάλωση προκύπτει:

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power(kw) \Rightarrow \dot{m}_f = 0,1725 \left(\frac{kg}{kWh} \right) * 9370kw \Rightarrow$$

$$\dot{m}_f = \mathbf{1616,325kg/h.}$$

$$\dot{m}_f \left(\frac{kg}{h} \right) = sfc \left(\frac{kg}{kWh} \right) * Power(kw) \Rightarrow \dot{m}_f = 0,215 \left(\frac{kg}{kWh} \right) * 30.200kw \Rightarrow$$

$$\dot{m}_f = \mathbf{6.493 kg/h.}$$

Οπότε η κατανάλωση του πλοίου για χρόνο ταξιδιού 12,66 ώρες προκύπτει:

$$\text{Κατανάλωση ταξιδιού} = \text{ωριαία κατανάλωση (kg/h)} * \text{χρόνος ταξιδιού (h)} = \\ (1616,325 + 6493 \text{ kg/h}) * 12,66 \text{ h} = 102.664,0545\text{kg} \Rightarrow \mathbf{\text{Κατανάλωση ταξιδιού} = 102,66 \text{ t.}}$$

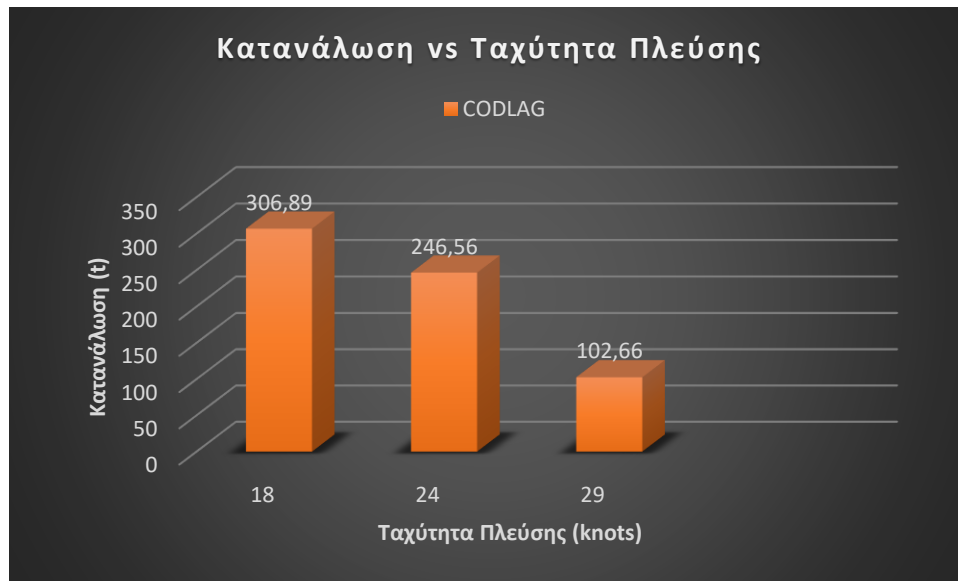
Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας που παρουσιάζει τη συνολική ποσότητα καυσίμου σε τόνους που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα και στην συνολική ποσότητα απαιτηθέντος καυσίμου για το ταξίδι των 5000 ναυτικών μιλίων.



Παναγιώτης - Φανούρης Αρμάος,
“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”

Πίνακας 5. Συνολική κατανάλωση καυσίμου σε τόνους (t) της φρεγάτας 5.200 τόνων (t) με συνδυασμένο σύστημα (CODAD) για αποστολή 5000 ναυτικών μιλίων (nmi).

Τύπος πλεύσης	Ταχύτητα πλεύσης (knots)	Engine Load (%)	Fuel consumption (Kg/kWh)	Ισχύς έκαστης κινητήριας μονάδας (kW)	Αριθμός κινητήριων μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία	Συνολική ισχύς πλοίου (kW)	Χρόνος πλεύσης (h)	Κατανάλωση ανά ώρα πλεύσης (kg/h)	Κατανάλωση ταξιδιού (kg)	Κατανάλωση ταξιδιού (t)
High patrol	18	100	0,1725	4.685	2	9.370	189,87	1.616,325	306.891,63	306,89
Transit patrol	24	75	0,215	22.650	1	22.650	50,63	4.869,75	246.555,4425	246,56
Sprint patrol	29	100	0,1725 0,215	4.685 30.200	2 1	39.570	12,66	1.616,325 6.493	102.664,0545	102,66
									ΣΥΝΟΛΙΚΗ	656,11



Γράφημα 4. Κατανάλωση καυσίμου φρεγάτας ανά ταχύτητα πλεύσης, με συνδυασμένο σύστημα CODLAG.

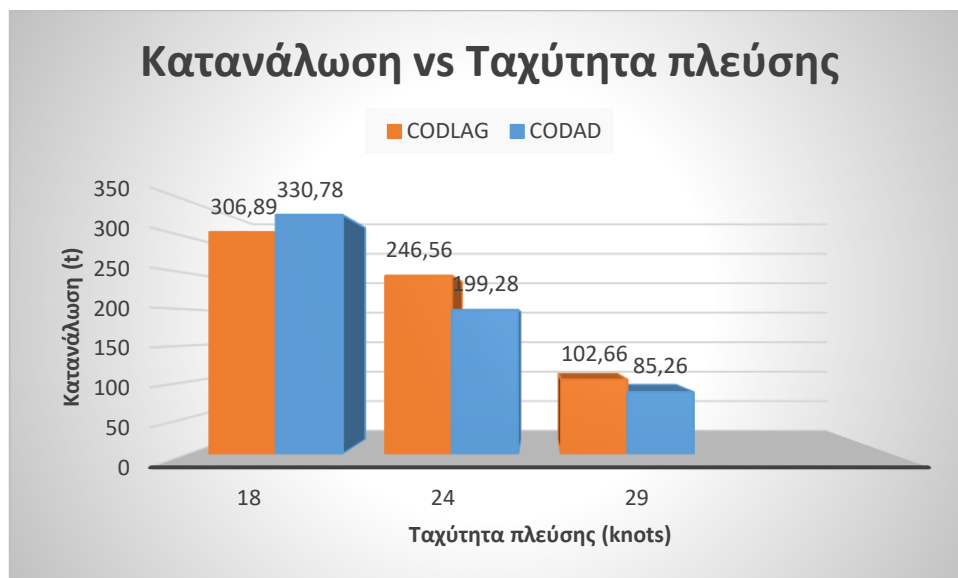


5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη του οικονομικότερου, από πλευράς κατανάλωσης καυσίμου, συνδυασμένου συστήματος πρόωσης για μία Φ/Γ εκτοπίσματος 5200 τόνων, σε δεδομένο σενάριο αποστολής, μέσα από την μελέτη των δύο παρακάτω συνδυασμένων συστημάτων:

- CODAD
- CODLAG

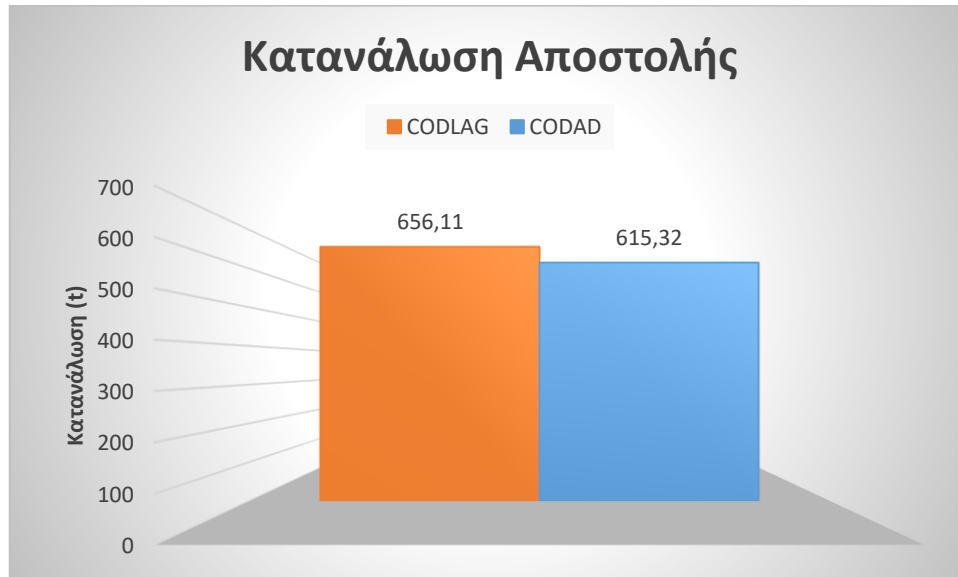
Στο Γράφημα 5 παρουσιάζεται η διαφορά της καταναλισκόμενης ποσότητας καυσίμου των παραπάνω συνδυασμένων συστημάτων, ανά ταχύτητα πλεύσης.



Γράφημα 5. Κατανάλωση ανά ταχύτητα πλεύσης συστημάτων, CODAD & CODLAG εγκατεστημένα στον ίδιο τύπο πλοίου για δεδομένο σενάριο αποστολής.



Στο Γράφημα 6 παρουσιάζεται η διαφορά της συνολικής καταναλισκόμενης ποσότητας καυσίμου των παραπάνω συνδυασμένων συστημάτων.



Γράφημα 6. Κατανάλωση αποστολής, CODAD & CODLAG εγκατεστημένα στον ίδιο τύπο πλοίου για δεδομένο σενάριο αποστολής.

Μελετώντας τα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε ότι το συνδυασμένο σύστημα CODLAG υπερτερεί μόνο στη χαμηλή ταχύτητα πλεύσης (18 knots), ενώ στις άλλες ταχύτητες υπερτερεί το CODAD. Συνολικά το CODAD αναδεικνύεται οικονομικότερο από το CODLAG με πολύ μικρή όμως διαφορά, γεγονός που από μόνο του δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για την επιλογή του. Περαιτέρω μπορεί να ληφθεί υπόψη το κόστος απόκτησης και συντήρησης των τεσσάρων κινητήριων μονάδων που αποτελούν το συνδυασμένο σύστημα CODAD καθώς επίσης ο επιπλέον χώρος που απαιτείται για την εγκατάστασή τους και το βάρος των $4 * 92,5 = 370$ τόνων. Από την άλλη το συνδυασμένο σύστημα CODLAG απαιτεί την απόκτηση και συντήρηση μόνο δύο κινητήριων μονάδων $2 * 90 = 180$ τόνων και ενός αεριοστροβίλου 5,237 τόνων, συνολικού βάρους εγκατάστασης $180 + 5,237 = 185,237$ τόνων.

Συμπερασματικά, εάν το μοναδικό κριτήριο επιλογής ενός εκ των δύο συστημάτων είναι η χαμηλή κατανάλωση, τότε η επιλογή κλείνει προς το συνδυασμένο σύστημα CODAD.



Παναγιώτης - Φανούρης Αρμάος,
“Συστήματα Πρόωσης Πλοίων Επιφανείας”

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Ζάννης, Θ. Κ., 2020-2021. *Βασικά Στοιχεία Ναυτικών Μηχανών Πρόωσης και Βοηθητικών Συστημάτων Πλοίου*. Πειραιάς: Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Τομέας Ναυπηγικής & Ναυτικής Μηχανολογίας.
- Κλιάνης, Λ. Χ., Νικολός, Ι. Κ. & Σιδέρης, Ι. Α., 2017. *Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως*. Β' Έκδοση επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- Κλιάνης, Λ. Χ., Νικολός, Ι. Κ. & Σιδέρης, Ι. Α., 2018. *Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως*. Β' Έκδοση επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.

ΞΕΝΗ

- General Electric, 2022. *Geaviation*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: www.geaviation.com
- Ohmayer, H. F., 2012. *Propulsion System Choices for modern Naval Vessels*, Washington: s.n.
- Roumeliotis, I. και συν., 2018. *Comparative Assessment of Various Combined Propulsion Systems through a Frigate Mission Analysis*. s.l., Hellenic Naval Academy & University of Nicosia.
- Wartsila, 2022. *Wartsila*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.wartsila.com/>