

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ**

Γαλανόπουλος Νικόλαος  
Αριθμός Μητρώου: 46144171

Επιβλέπων Καθηγητής: Θεοδωρακάκος Ανδρέας  
Αναπλ. Καθηγητής

Αθήνα, 2023

UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

**DIPLOMA THESIS**  
**MARINE COMBINED PROPULSION SYSTEMS**

GALANOPOULOS NIKOLAOS  
Registration Number: 46144171

Supervisor: Dr. Theodorakakos Andreas

Athens, 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/a</b>	<b>ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1.	ΝΙΚΑΣ Κ. Σ.	Καθηγητής	
2.	ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ Α	Αναπληρωτής Καθηγητής	
3.	ΤΣΟΛΑΚΗΣ Α.	Αναπληρωτής Καθηγητής	

**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γαλανόπουλος Νικόλαος του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 46144171 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα συνδυασμένα συστήματα ναυτικής πρόωσης, συνδυάζονται διατάξεις συστημάτων όπως αεριοστρόβιλοι, πετρελαιοκινητήρες, ηλεκτροκινητήρες, ατμοστρόβιλοι και μέσω της συνδυασμένης λειτουργίας αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα κάθε τύπου κινητήρα. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα. Μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου, παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία σχετικά με τις ταχύτητες λειτουργίας πλεύσης του πλοίου, μειώνουν τις εκπομπές ρύπων και συμβάλουν στην προστασία του περιβάλλοντος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αρχικά αναφέρονται ορισμένοι σημαντικοί συντελεστές και παράμετροι σχετικά με την κατασκευή του πλοίου, καθώς επισημαίνεται και η σπουδαιότητα αυτών στην λειτουργία του. Στην συνέχεια αναφέρονται τα κυριότερα συστήματα πρόωσης και αναλύεται η τεχνολογία σχετικά με τις προπέλες αλλά και η κρισιμότητα επιλογής της για κάθε περίπτωση. Ακόμη, γίνεται αναφορά στον κύριο εξοπλισμό πρόωσης και εγκατάστασης ενός συστήματος πρόωσης.

Σε επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται η λειτουργία συμβατικών αλλά και πειραματικών συστημάτων πρόωσης. Τέλος γίνεται αναφορά σε συνδυαστικά συστήματα πρόωσης αλλά και στον τρόπο με τον οποίο συνεργάζονται μεταξύ τους αεριοστρόβιλοι, πετρελαιοκινητήρες, ατμοστρόβιλοι, πυρηνικοί αντιδραστήρες και άλλου τύπου μορφών πρόωσης, επιτυγχάνοντας οφέλη για την λειτουργία του πλοίου.

**Λέξεις κλειδιά: συνδυαστικά συστήματα πρόωσης, πετρελαιοκινητήρες, αεριοστρόβιλοι, προπέλα**

## **ABSTRACT**

In combined propulsion systems, arrangements of systems such as gas turbines, diesel engines, electric motors, steam turbines are combined, and the advantages of each type of engine are utilized through combined operation. These systems offer several significant advantages. They reduce fuel consumption, provide greater flexibility in terms of ship operating speeds, reduce emissions, and contribute to environmental protection.

In this thesis, initially, some important factors and parameters regarding ship construction are mentioned, highlighting their significance in its operation. Then, the main propulsion systems are discussed, analyzing the technology related to propellers as well as the criticality of their selection for each case. Furthermore, reference is made to the main propulsion equipment and the installation of a propulsion system.

In the next chapter, the operation of conventional as well as experimental propulsion systems is examined. Finally, reference is made to combined propulsion systems and how gas turbines, diesel engines, steam turbines, nuclear reactors, and other types of propulsion methods cooperate with each other, achieving benefits for the ship's operation.

**Keywords: combined propulsion systems, diesel engines, gas turbines, propeller**

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ.....	8
1.1. Ορολογίες πλοίου και αντίσταση γάστρας.....	8
1.1.1. Καθοριστικοί παράγοντες μεγέθους πλοίου.....	10
1.1.2. Μικτή και καθαρή χωρητικότητα.....	11
1.1.3. Συντελεστές σχετικοί με την γάστρα.....	11
1.1.4. Τύποι πλοίων και εφαρμογές μηχανής.....	13
1.1.5. Επίδραση βαθμών απόδοσης στη συνολική κατανάλωση καυσίμου.....	13
1.1.6. Αντίσταση και βασικές παράμετροι.....	14
1.1.7. Συνιστώσες αντίστασης.....	14
1.1.8. Παράμετροι που επηρεάζουν την αντίσταση.....	17
1.2. Συστήματα πρόωσης.....	20
1.3. Βασικά μέρη συστημάτων πρόωσης.....	21
2. Η ΚΥΡΙΑ ΙΣΧΥΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ.....	22
2.1. Λειτουργία συστημάτων πρόωσης.....	22
2.2. Πηγές ενέργειας.....	22
2.3. Είδη μηχανών.....	23
2.4. Είδη προωθητήρων.....	27
2.4.1. Ατμοκινητήρες.....	30
2.4.2. Κινητήρες Diesel.....	31
2.4.3. Ατμοστρόβιλοι.....	34
2.4.4. Αεριοστρόβιλοι.....	35
2.4.5. Στρόβιλος πυρηνικής ενέργειας.....	36
2.5. Αντιστοιχία μηχανών και πλοίων.....	38
3. ΠΡΟΠΕΛΑ.....	40
3.1. Τύποι προπέλας.....	41
3.1.1. Προπέλα τριών πτερυγίων.....	41
3.1.2. Προπέλα τεσσάρων πτερυγίων.....	41
3.1.3. Προπέλα πέντε πτερυγίων.....	42
3.2. Βήμα Προπέλας.....	42
3.3.1. Προπέλα σταθερού βήματος.....	42
3.3.2. Προπέλα ελεγχόμενου βήματος.....	43
3.3. Σηπλαιώση.....	43
4. ΚΥΡΙΕΣ ΑΡΧΕΣ & ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ/ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	45
4.1. Συζεύκτες.....	45
4.2. Μηχανισμοί μείωσης.....	45

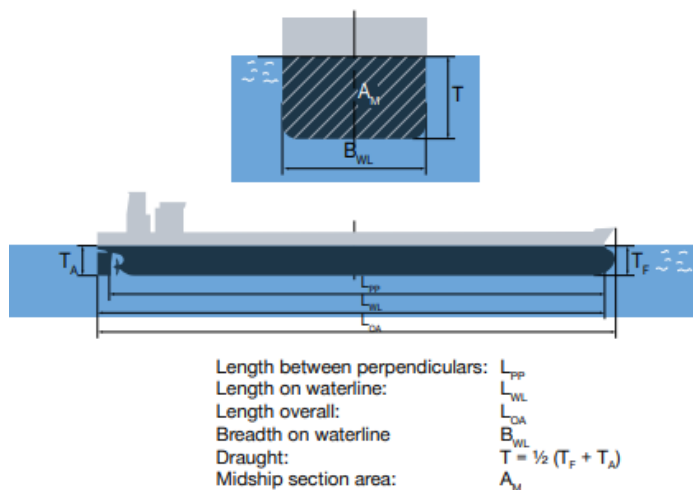
4.3. Ωστικά έδρανα .....	46
4.4. Περίβλημα άξονα .....	47
4.5. Τοποθέτηση Ατράκτου .....	47
5. ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΩΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....	48
5.1. Κατευθυνόμενο σύστημα Azimuth .....	48
5.2. Πρόωση με αντλία εκτόξευσης νερού .....	49
5.3. Αιολική πρόωση .....	49
5.4. Πρόωση με κυψέλες καύσιμου .....	50
5.5. Πρόωση μέσω συλλογής ηλιακής ενέργειας .....	51
5.6. Προωστήριες μηχανές υγροποιημένου φυσικού αέριου .....	52
5.7. Μαγνητοϋδροδυναμική πρόωση .....	53
6. ΣΥΝΔΙΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ .....	54
6.1 Συνδυασμός πετρελαιοκινητήρων (CODAD) .....	55
6.2 Συνδυασμοί αεροστροβίλων και πετρελαιοκινητήρων .....	56
6.2.1 Σύστημα πρόωσης CODAG .....	56
6.2.2 Σύστημα πρόωσης CODOG .....	57
6.2.3 Σύστημα πρόωσης CODLAG .....	57
6.2.4 Σύστημα πρόωσης CODAG-WARP .....	58
6.2.5 Σύστημα πρόωσης CODOGX & CODAGX .....	59
6.2.6 Σύστημα πρόωσης COGAGX-DX .....	60
6.3 Συνδυασμοί αεροστροβίλων στα συστήματα πρόωσης .....	60
6.3.1 Συνδυασμός αεριοστροβίλων (COGAG) .....	61
6.3.2 Συνδυασμός αεριοστροβίλων (COGOG) .....	62
6.3.3 Σύστημα πρόωσης COGAGX .....	63
6.4 Άλλα συνδυαστικά συστήματα πρόωσης .....	63
6.4.1 Σύστημα πρόωσης COGAS .....	63
6.4.2 Σύστημα πρόωσης COGES .....	64
6.4.3 Σύστημα πρόωσης COSAG .....	64
6.4.4 Σύστημα πρόωσης CONAG .....	65
6.4.5 Σύστημα πρόωσης CONAS .....	65
6.4.6 Συνδυασμός πετρελαιοκινητήρων & κυψελών καυσίμου .....	66
6.5 Υβριδική πρόωση .....	67
6.5.1 Υβριδική πρόωση με συστήματα τύπου CODLAD & CODLOD .....	70
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	71
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	72



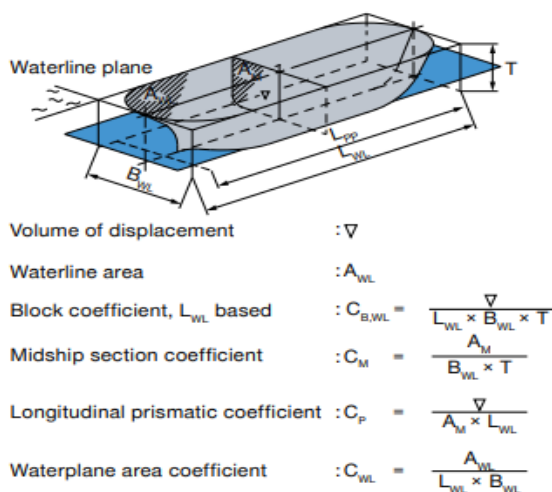
## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΣΗΣ

### 1.1. Ορολογίες πλοίου και αντίσταση γάστρας

Το συνολικό μήκος του πλοίου LOA (length overall) δεν επηρεάζει στον υπολογισμό της υδροδυναμικής αντίστασης της γάστρας (hull). Οι καθοριστικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται είναι το μήκος της γραμμής ισάλου LWL (waterline length) και το λεγόμενο μήκος μεταξύ καθέτων LPP (perpendiculars). Οι διαστάσεις που αναφέρονται απεικονίζονται παρακάτω στην εικόνα 1.1.[1]



**Εικόνα 1.1** Διαστάσεις Γάστρας. [2]



**Εικόνα 1.2** Συντελεστές Γάστρας. [2]

Όσον αφορά το μήκος μεταξύ καθέτων (length between perpendiculars), είναι η απόσταση μεταξύ της προωραίας καθέτου, δηλαδή συνήθως μιας κατακόρυφης ευθείας που περνά από το σημείο που το προωραίο τένει την γραμμή ισάλου, και της πρυμναίας καθέτου που συνήθως συμπίπτει με τον άξονα του πηδαλίου. Γενικά, αυτό το μήκος είναι σχετικά μικρότερο από το μήκος της γραμμής ισάλου και γενικά ο συντελεστής ισάλου επιφανείας είναι περίπου κατά 0.10 υψηλότερος από το

συντελεστή γάστρας, δηλαδή:  $C_{WL} = C_B + 0.10$ . Αυτή η διαφορά θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη για γρήγορα πλοία με χαμηλούς συντελεστές γάστρας, όπου η πρύμνη είναι μερικώς βυθισμένη στο νερό και γίνεται έτσι τμήμα της "ισάλου" επιφανείας.

Το βύθισμα (draught) του πλοίου, (τυπικά συμβολίζεται με  $T$ ), ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση από την ίσαλο γραμμή μέχρι το πιο βαθύ στο νερό σημείο της γάστρας (εικόνες 1.1 και 1.2). Το πρωραίο βύθισμα  $T_F$  και το πρυμναίο βύθισμα  $T_A$  είναι κανονικά ίσα, όταν το πλοίο βρίσκεται στην έμφορτη κατάσταση δηλαδή όχι διαγωγή / ζυγοστάθμιση (trim).

Το «βύθισμα αντοχής» (scantling draught) είναι η απόσταση από την τρόπιδα (keel) έως τη γραμμή φορτώσεως θέρους. Το βύθισμα έρματος (ballast draught) είναι το βύθισμα του πλοίου χωρίς εμπόρευμα αλλά με αρκετό νερό έρματος για να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του πλοίου. Γενικά, το πιο συχνά εμφανιζόμενο βύθισμα μεταξύ του βυθίσματος αντοχής και έρματος χρησιμοποιείται ως «βύθισμα σχεδιασμού». [1]

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το μεγαλύτερο πλάτος (breadth) της γάστρας στην ίσαλο γραμμή  $B_{WL}$ . (εικόνα 1.1).

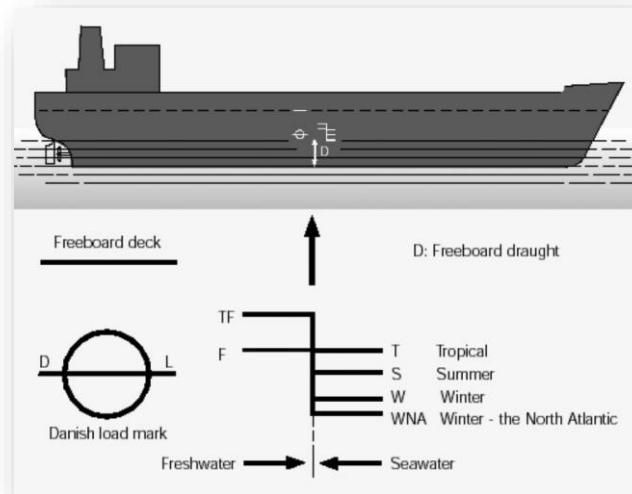
Το ύψος (depth of hold) περιγράφει την απόσταση από την τρόπιδα έως την από κάτω πλευρά ενός δεδομένου καταστρώματος του πλοίου και τυπικά συμβολίζεται με  $D$ . Το ύψος κατασκευής (moulded depth) περιγράφει την απόσταση από την τρόπιδα έως το κατάστρωμα εξάλων (freeboard deck) μετρημένο στις πλευρές του πλοίου. [1]

Στο μέσον του μήκους του πλοίου είναι σχεδιασμένη η σήμανση γραμμής φορτώσεως (γνωστή επίσης ως Plimsoll λόγω του εφευρέτη του) (εικόνα 1.3). Οι γραμμές και τα γράμματα της σήμανσης Plimsoll, τα οποία ανταποκρίνονται στους κανονισμούς εξάλων, όπως αυτοί ορίζονται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization - IMO) και τις τοπικές αρχές, δείχνουν το βύθισμα μέχρι το οποίο το σκάφος μπορεί να φορτωθεί με ασφάλεια. Ο όρος ύψος εξάλων αναφέρεται στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ του κύριου καταστρώματος και της γραμμής ισάλου. [1]

$$L_{pp} = 0.96 - 0.98 \times LW$$

Υπάρχουν, για παράδειγμα, γραμμές φόρτωσης για πλεύση σε γλυκό ή θαλάσσιο νερό, αντίστοιχα, με τη δικαιολογία της διαφοράς στην πυκνότητα μάζας του νερού και την αντίστοιχη διαφορά στην πλευστότητα ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άλατα. Επιπλέον υποδιαίρέσεις δίνονται για τροπικές συνθήκες και πλεύση το καλοκαίρι ή το χειμώνα. Σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς εξάλων, το θερινό βύθισμα εξάλων για θαλάσσιο νερό είναι ίσο με το βύθισμα αντοχής.

Το χειμερινό βύθισμα εξάλων είναι μικρότερο από το αντίστοιχο που ισχύει το καλοκαίρι λόγω των αυξημένων κινδύνων από κακοκαιρία. Αντίστοιχα, μικρότερο βύθισμα εξάλων επιτρέπεται και στα τροπικά ύδατα.



**Εικόνα 1.3** Γραμμές φορτώσεως. [2]

### 1.1.1. Καθοριστικοί παράγοντες μεγέθους πλοίου

Όταν ένα πλοίο σε φορτωμένη κατάσταση επιπλέει σε μια αυθαίρετη γραμμή ισάλου, το εκτόπισμα του είναι ίσο με τη σχετική μάζα νερού που εκτοπίζεται από το πλοίο. Το εκτόπισμα είναι συνεπώς ίσο με το συνολικό βάρος του σχετικού φορτωμένου πλοίου, συνήθως σε θαλασσινό νερό με πυκνότητα μάζας 1.025 t/m<sup>3</sup>.

Το εκτόπισμα περιλαμβάνει το μόνιμο ή άφορτο (lightweight) και το πρόσθετο βάρος (deadweight) του πλοίου, όπου το πρόσθετο βάρος είναι ίσο με την ικανότητα φόρτωσης του πλοίου, συμπεριλαμβανομένων των αποθηκών, δεξαμενών καυσίμου και άλλων προμηθειών που είναι απαραίτητα για την πρόωση του πλοίου. Το πρόσθετο βάρος ανά πάσα στιγμή αντιπροσωπεύει έτσι τη διαφορά μεταξύ του πραγματικού εκτοπίσματος και του μόνιμου βάρους του πλοίου (όλα σε τόνους) :

$$\text{Πρόσθετο βάρος} = \text{Εκτόπισμα} - \text{Άφορτο βάρος}$$

Η λέξη «τόνος» δεν εκφράζει πάντα το ίδιο βάρος. Εκτός από τον μετρικό τόνο (1.000 kg), υπάρχει και ο αγγλικός τόνος (1.016 kg), ο οποίος ονομάζεται επίσης «μακρύς τόνος». Ο "κοντός τόνος" είναι περίπου 907 kg. Η χωρητικότητα πρόσθετου βάρους (deadweight tonnage - dwt) βασίζεται στην ικανότητα φόρτωσης του πλοίου, συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων και λιπαντικών λαδιών κ.λπ. που απαιτούνται για τη λειτουργία του πλοίου. Συχνά χρησιμοποιείται ως ένδειξη μεγέθους, αναφέρεται στην ικανότητα φόρτωσης όταν το πλοίο φορτώνεται στο βύθισμα αντοχής του, δηλαδή στη θερινή γραμμή φόρτωσης.

Μερικές φορές, η χωρητικότητα πρόσθετου βάρους μπορεί επίσης να αναφέρεται στην ικανότητα φόρτωσης του πλοίου στο βύθισμα σχεδιασμού, στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να διευκρινίζεται ρητά. Το μόνιμο βάρος ενός πλοίου περιγράφει το βάρος του ίδιου του πλοίου σε άφορτη κατάσταση, δηλαδή χωρίς φορτίο στο πλοίο. Η χωρητικότητα άφορτου βάρους (lightweight tonnage - lwt) συνήθως δεν χρησιμοποιείται για να δείξει το μέγεθος ενός πλοίου. Ο χαρακτηρισμός «ωφέλιμο φορτίο» περιγράφει το βάρος που μπορεί να φορτωθεί στο πλοίο, εξαιρουμένων των αποθηκών και των προμηθειών που είναι απαραίτητα για την πρόωση του πλοίου. [1] [3]

### 1.1.2. Μικτή και καθαρή χωρητικότητα

Συνοπτικά, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν επίσης μεγέθη όπως η μικτή ολική χωρητικότητα (gross tonnage - gt) και η καθαρή χωρητικότητα (net tonnage - nt), οι οποίες υπολογίζονται με βάση τον όγκο του πλοίου και τον πολλαπλασιαστή που ορίζεται από τον IMO στη διεθνή σύμβαση για τη μέτρηση της χωρητικότητας των πλοίων. Η μικτή χωρητικότητα περιγράφει ολόκληρο τον έγκλειστο χώρο του πλοίου, ενώ η καθαρή χωρητικότητα καλύπτει μόνο τους χώρους εμπορεύματος. Αυτές οι μετρήσεις συχνά αποτελούν τη βάση για διαφορετικές απαιτήσεις από τον IMO.

Η μικτή και καθαρή χωρητικότητα δεν πρέπει να συγχέεται με τους παλαιότερους όρους πριν από τη σύμβαση μικτοί τόνοι νηολογίου (gross register tons - grt) και καθαροί τόνοι νηολογίου (net register tons - nrt) όπου 1 τόνος αντιστοιχεί σε 100 αγγλικά κυβικά πόδια, ή 2.83 m<sup>3</sup>. [3]

### 1.1.3. Συντελεστές σχετικοί με την γάστρα

Το μήκος, πλάτος, βύθισμα και ύψος καθώς και το βάρος μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ορισμένα επιπρόσθετα μέτρα για τον υπολογισμό ορισμένων αδιάστατων συντελεστών. Χρησιμοποιούνται διάφοροι συντελεστές για την έκφραση του σχήματος της γάστρας. Ο πιο σημαντικός από αυτούς τους συντελεστές είναι ο συντελεστής γάστρας C<sub>B</sub>, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του όγκου εκτοπίσματος ∇ και του όγκου ενός κουτιού με διαστάσεις L<sub>WL</sub> x B<sub>WL</sub> x T, (εικόνα 1.2).

$$C_{B,WL} = \frac{\nabla}{L_{WL} \times B_{WL} \times T}$$

Στην προαναφερθείσα περίπτωση, ο συντελεστής γάστρας αναφέρεται στο μήκος στην ίσαλο γραμμή L<sub>WL</sub>. Ωστόσο, οι ναυπηγοί συχνά χρησιμοποιούν συντελεστή γάστρας C<sub>B,PP</sub> με βάση το μήκος μεταξύ κάθετων, L<sub>PP</sub>, οπότε ο συντελεστής γάστρας θα είναι, κατά κανόνα, ελαφρώς μεγαλύτερος, επειδή το L<sub>PP</sub> είναι συνήθως λίγο μικρότερο από το L<sub>WL</sub>.

$$C_{B,PP} = \frac{\nabla}{L_{PP} \times B_{WL} \times T}$$

Ο συντελεστής ισάλου επιφάνειας C<sub>WL</sub> εκφράζει το λόγο μεταξύ της ισάλου επιφάνειας A<sub>WL</sub> του πλοίου και του γινομένου του μήκους L<sub>WL</sub> και του πλάτους B<sub>WL</sub> του πλοίου στην γραμμή ισάλου (εικόνα 1.2).

$$C_{WL} = \frac{A_{WL}}{L_{WL} \times B_{WL}}$$

Γενικά ο συντελεστής ισάλου επιφάνειας είναι περίπου μεγαλύτερος κατά 0.1 του συντελεστή γάστρας.

$$C_{WL} = C_B + 0.1$$

Αυτή η διαφορά είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στα γρήγορα πλοία με μικρούς συντελεστές γάστρας, όπου η πρύμνη είναι μερικώς βυθισμένη στο νερό και ως εκ τούτου γίνεται μέρος της ισάλου επιφάνειας. [3]

### Συντελεστής μεσαίου τμήματος

Μια περαιτέρω περιγραφή της γάστρας παρέχεται από τον συντελεστή  $C_M$ , ο οποίος εκφράζει το λόγο μεταξύ της περιοχής ενός τμήματος στο μέσο του πλοίου που βρίσκεται κάτω από την ίσαλο γραμμή  $A_M$  (στο μέσο της απόστασης μεταξύ της πρωραίας και της πρυμναίας καθέτου) και του γινομένου του πλάτους  $B_{WL}$  του πλοίου και του βυθίσματος  $T$  (εικόνα 1.2).

$$C_M = \frac{A_M}{B_{WL} \times T}$$

Γενικά, ο συντελεστής μεσαίου τμήματος για εμπορικά πλοία (εκτόπισμα) είναι υψηλός, της τάξης των 0.95 – 0.99. Χαμηλές τιμές βρίσκονται για τα γρήγορα πλοία, όπως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, ενώ υψηλές τιμές για τα πιο αργά φορτηγά πλοία και δεξαμενόπλοια. Τα γρήγορα επιβατηγά και τα ναυτικά πλοία μπορούν να έχουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές.

### Πρισματικός Συντελεστής

Ο πρισματικός συντελεστής  $C_P$  εκφράζει το λόγο μεταξύ του όγκου εκτοπίσματος  $\nabla$  και του γινομένου της επιφάνειας μέσης τομής  $A_M$  και του μήκους της γραμμής ισάλου  $L_{WL}$  (εικόνα 1.2).

$$C_P = \frac{\nabla}{A_M \times L_{WL}} = \frac{\nabla}{C_M \times B_{WL} \times T \times L_{WL}} = \frac{C_{B,WL}}{C_M}$$

Ο πρισματικός συντελεστής περιγράφει πόσο ογκώδες είναι το πρωραίο και το πρυμναίο μέρος του πλοίου. Ένας χαμηλός πρισματικός συντελεστής υποδηλώνει ένα ογκώδες μεσαίο τμήμα σε σύγκριση με τα εμπρός και πίσω τμήματα.

### Λόγος μήκους προς εκτόπισμα

Ο λόγος μήκους προς εκτόπισμα (fineness ratio)  $CLD$  ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του μήκους της γραμμής ισάλου του πλοίου  $L_{WL}$  και του μήκους πλευράς ενός κύβου με όγκο ίσο με τον όγκο του εκτοπίσματος. [6]

$$C_{LD} = \frac{L_{WL}}{\sqrt[3]{\nabla}}$$

### Διαμήκες κέντρο άνωσης

Το διάμηκες κέντρο άνωσης (Longitudinal Center of Buoyancy – LCB) εκφράζει τη θέση του κέντρου άνωσης και ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ του κέντρου άνωσης και του μεσαίου σημείου μεταξύ των πρωραίων και των πρυμναίων καθέτων του πλοίου, που ονομάζεται «μέσο του πλοίου». Η απόσταση αναφέρεται κανονικά ως ποσοστό του μήκους μεταξύ των καθέτων.

Το αν το LCB είναι θετικό σε περίπτωση που βρίσκεται μπροστά από το μέσο του πλοίου ή πίσω από το μέσο δεν είναι αυστηρό. Η Holtrop Mennen μέθοδος πρόβλεψης ισχύος ορίζει το LCB θετικό πρώραθεν του μέσου, ενώ η μέθοδος του Harvald καθορίζει το LCB θετικό πρύμνηθεν του μέσου.

Για πλοίο σχεδιασμένο για υψηλές ταχύτητες, π.χ. πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, το LCB, κανονικά, θα είναι αρνητικό, ενώ για τα πλοία χαμηλής ταχύτητας, όπως τα δεξαμενόπλοια και τα φορτηγά πλοία, θα είναι συνήθως θετικό. Το LCB είναι γενικά μεταξύ –3% και + 3%. [5]

### Διάμηκες κέντρο πλευστότητας

Το διάμηκες κέντρο πλευστότητας (longitudinal center of flotation – LCF) είναι το γεωμετρικό κέντρο της ισάλου επιφάνειας, το οποίο δεν συμπίπτει απαραίτητα με τη θέση του μέσου του πλοίου, επειδή το πλοίο συνήθως δεν είναι συμμετρικό γύρω από αυτό το σημείο κατά τη διαμήκη κατεύθυνση. Το πλοίο ζυγοσταθμίζεται σε αυτό το σημείο και όχι στο LCB. [5]

#### 1.1.4. Τύποι πλοίων και εφαρμογές μηχανής

Ανάλογα με τη φύση του εμπορεύματος τους, καθώς και τον τρόπο χειρισμού του φορτίου, τα πλοία μπορούν να χωριστούν σε διαφορετικές κατηγορίες. Οι τρεις μεγαλύτερες κατηγορίες πλοίων είναι πλοία μεταφοράς εμπορευματο-κιβωτίων, φορτηγά χύδην φορτίων (για χύδην εμπορεύματα όπως σιτάρι, άνθρακας, μεταλλεύματα κ.λπ.) και δεξαμενόπλοια, τα οποία και πάλι μπορούν να χωριστούν σε πιο συγκεκριμένες υποκατηγορίες και τύπους. [6] εμπορευματοκιβώτια που στοιβάζονται στο κατάστρωμα. Οι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως ως κύριοι κινητήρες πρόωσης. Οι δίχρονοι κινητήρες ντίζελ έχουν τις υψηλότερες αποδόσεις μεταξύ των εσωτερικών μηχανών καύσης για πρόωση. Αυτό αντικατοπτρίζεται στο γεγονός ότι οι δίχρονοι κινητήρες είναι ουσιαστικά ο μόνος κινητήρας επιλογής για τύπους πλοίων, όπου οι τιμές καυσίμου αντιπροσωπεύουν το κύριο κόστος λειτουργίας, για παράδειγμα δεξαμενόπλοια, φορτηγά χύδην και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που εκτελούν μεταφορές μεταξύ των ηπείρων. [6]

Για εξειδικευμένα πλοία, όπως επιβατικά και κρουαζιερόπλοια, άλλες παράμετροι μπορούν να αποτελούν τους κύριους οικονομικούς παράγοντες. Η υψηλότερη πυκνότητα ισχύος (higher power density) και το χαμηλότερο ύψος των τετράχρονων κινητήρων μπορούν να τους κάνουν πιο ελκυστικούς σε τέτοιες περιπτώσεις. Για μεγάλα πλοία που ταξιδεύουν σε ωκεανούς, οι προπέλες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller - FPP) είναι η πιο συνηθισμένη επιλογή, ενώ οι προπέλες ελεγχόμενου βήματος (Controllable Pitch Propeller - CPP) χρησιμοποιούνται συχνά για μικρότερα πλοία που σταθμεύουν σε μικρότερα λιμάνια που απαιτούν αυξημένη ευελιξία. Στην περίπτωση ενός δίχρονου κύριου κινητήρα, είναι δυνατή η σύζευξη της προπέλας απευθείας με τον κύριο κινητήρα, καθώς μπορεί να βρεθεί ένας κινητήρας με στροφές ανά λεπτό που να ταιριάζει με τη βέλτιστη ταχύτητα προπέλας. Για τετράχρονους κινητήρες, οι υψηλότερες στροφές του κινητήρα απαιτούν μειωτήρες. [7]

#### 1.1.5. Επίδραση βαθμών απόδοσης στη συνολική κατανάλωση καυσίμου

Η συνολική ισχύς καυσίμου,  $P_{fuel}$  (ισχύς που παρέχεται μέσω του καυσίμου), που απαιτείται για την πρόωση ενός πλοίου μέσα στο νερό, διέπεται από την εξίσωση καυσίμου.

$$P_{fuel} = \frac{R_T \times V}{\eta_H \times \eta_O \times \eta_R \times \eta_S \times \eta_E} \text{ "Εξίσωση καυσίμου"}$$

Η αντίσταση της γάστρας,  $R_T$ , επηρεάζεται από πολλαπλές παραμέτρους. Γενικά, η αντίσταση είναι ανάλογη της ταχύτητας υψωμένης σε δύναμη  $i = 2$  έως  $3$ ,  $R \propto k \times V^i$ . Αυτό σημαίνει ότι όταν αυξάνεται η ταχύτητα υψωμένη σε δύναμη  $1$  (γραμμικά), η απαιτούμενη ισχύς θα αυξάνεται με την ταχύτητα σε υψηλότερη δύναμη,  $P \propto k \times V^{i+1}$  όπου  $i+1=3$  ή  $i+1=4$ .

Η ταχύτητα σχεδιασμού του πλοίου ορίζεται τυπικά σύμφωνα με την επιθυμία του ιδιοκτήτη, εάν δεν περιορίζεται λόγω κανονισμών. Στην εξίσωση καυσίμου, το γινόμενο της αντίστασης και της

ταχύτητας διαιρείται με τους βαθμούς απόδοσης όλων των συνιστωσών που εμπλέκονται στην πρόωση του πλοίου.

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλοί υπότυποι πλοίων, καθώς και συνδυασμοί αυτών των υποτύπων, δηλαδή πλοία που μεταφέρουν φορτίο ro-ro (roll-on/roll-off) στη γάστρα και Ο<sub>ΠΗ</sub> είναι ο βαθμός απόδοσης της γάστρας. Λαμβάνει υπόψη τη διαφορά στην πραγματική ισχύ (ρυμούλκησης) και την ισχύ ώσης που πρέπει να παρέχεται στην προπέλα, επειδή η γάστρα επιταχύνει το νερό το οποίο καταλήγει μετά από αυτήν στην προπέλα.

- Ο  $\eta_0$  είναι ο βαθμός απόδοσης της προπέλας σε ελεύθερη ροή νερού (όχι πίσω από τη γάστρα), δίνοντας την απόδοση της προπέλας που λειτουργεί σε ένα ομοιογενές πεδίο με ροή κάθετη προς την προπέλα.
- Ο  $\eta_R$  είναι ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής της προπέλας, που αντιπροσωπεύει τις αλλαγές στη ροή του νερού στην προπέλα πίσω από το πλοίο σε σχέση με τις συνθήκες ελεύθερης ροής νερού.
- Ο  $\eta_S$  είναι ο βαθμός απόδοσης του άξονα που συνδέει τον κύριο κινητήρα και την προπέλα και εξαρτάται από το μήκος του άξονα, εάν απαιτείται μετάδοση κλπ.
- Ο  $\eta_E$  περιγράφει το βαθμό απόδοσης του κινητήρα, ανάλογα με τον τύπο σχεδίασης και μια ποικιλία άλλων παραμέτρων. [1]

### 1.1.6. Αντίσταση και βασικές παράμετροι

Το μέγεθος της αντίστασης στη γάστρα του πλοίου,  $R_T$ , είναι φυσικά ύψιστης σημασίας για την ισχύ που απαιτείται για τη μετακίνηση του πλοίου (όπως φαίνεται στην εξίσωση ισχύος καυσίμου) και ως εκ τούτου για την κατανάλωση καυσίμου.

Η ακόλουθη ενότητα θα εξηγήσει τα φυσικά φαινόμενα που εμφανίζουν οι διαφορετικές συνιστώσες της συνολικής αντίστασης ήρεμου νερού, που ονομάζονται επίσης αντιστάσεις πηγής και θα ποσοτικοποιήσει τη συμβολή τους στη συνολική αντίσταση. [4]

### 1.1.7. Συνιστώσες αντίστασης

Η αντίσταση του πλοίου σε ήρεμα νερά επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ταχύτητα, το εκτόπισμα και τη μορφή της γάστρας. Η συνολική αντίσταση  $R_T$  αποτελείται από πολλές πηγές-αντιστάσεις  $R$ , οι οποίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες ομάδες, δηλαδή :

- Αντίσταση τριβής  $R_F$  (Frictional Resistance)
- Υπόλοιπη αντίσταση  $R_R$  (Residual Resistance)
- Αντίσταση αέρα  $R_A$  (Air Resistance)

Η επίδραση της αντίστασης τριβής εξαρτάται από τη διαβρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας, ενώ το μέγεθος της υπόλοιπης αντίστασης περιγράφει την ενέργεια που χάνεται από το πλοίο όταν αυτό δημιουργεί κύματα, και από την αντίσταση λόγω συνεκτικών δυνάμεων, η οποία εξαρτάται από τις γραμμές της γάστρας. Για αργά κινούμενα πλοία, όπως δεξαμενόπλοια και φορτηγά, η αντίσταση τριβής κυριαρχεί (70-90%), ενώ για τα ταχέως κινούμενα πλοία, η αντίσταση τριβής μπορεί να αντιπροσωπεύει μόλις το ήμισυ της συνδυασμένης αντίστασης.

Η αντίσταση του αέρα αντιπροσωπεύει κανονικά περίπου το 2% της συνολικής αντίστασης, ωστόσο, με σημαντική αύξηση έως περίπου 10% για πλοία με μεγάλες υπερκατασκευές όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με εμπόρευμα που στοιβάζεται στο κατάστρωμα. Εάν ληφθεί υπόψη η αντίσταση του ανέμου, οι τιμές ενδέχεται να αυξηθούν.

Το νερό με ταχύτητα  $V$  και πυκνότητα  $\rho$  έχει μια δυναμική πίεση ως εξής:

$$P_{dyn} = 1/2 \times \rho \times V^2 \text{ "Νόμος Bernoulli"}$$

Έτσι, εάν το νερό σταματήσει εντελώς από ένα σώμα, το νερό θα αντιδράσει στην επιφάνεια του σώματος με τη δυναμική πίεση, με αποτέλεσμα μια δύναμη στο σώμα.

Αυτή η σχέση χρησιμοποιείται ως βάση για τον υπολογισμό ή τη μέτρηση των αντιστάσεων πηγής  $R$  της γάστρας του πλοίου, μέσω αδιάστατων συντελεστών αντίστασης  $C$ . Έτσι, οι συντελεστές  $C$  σχετίζονται με τη δύναμη αναφοράς  $K$ , που ορίζεται ως η δύναμη που η δυναμική πίεση του νερού με την ταχύτητα του πλοίου  $V$  ασκεί σε μια επιφάνεια που είναι ίση με την βρεχόμενη περιοχή της γάστρας  $A_s$ . Η επιφάνεια του πηδαλίου περιλαμβάνεται επίσης στην βρεχόμενη επιφάνεια. Τα γενικά δεδομένα για υπολογισμούς αντίστασης βασίζονται έτσι στις ακόλουθες δύο σημαντικές σχέσεις :

- Δύναμη αναφοράς:  $K = 1/2 \times \rho \times V^2 \times A_s$
- Αντιστάσεις πηγής:  $R = C \times K$

Με βάση πολλές πειραματικές δοκιμές σε δεξαμενές και με τη βοήθεια κατάλληλων αδιάστατων παραμέτρων γάστρας, έχουν καθιερωθεί μέθοδοι για τον υπολογισμό όλων των απαραίτητων συντελεστών αντίστασης  $C$  και, συνεπώς, των σχετικών αντιστάσεων  $R$  σε πρώιμο στάδιο του έργου χωρίς δοκιμή.

Στην πράξη, ο κατά προσέγγιση υπολογισμός της αντίστασης ενός συγκεκριμένου πλοίου, ο οποίος απαιτείται για την αρχική διαστασιοποίηση, συχνά επαληθεύεται και βελτιστοποιείται δοκιμάζοντας ένα μοντέλο του πλοίου σε μια δεξαμενή. [4]

### **Αντίσταση τριβής $R_F$**

Η αντίσταση τριβής  $R_F$  είναι υπεύθυνη για δύο φαινόμενα: Πρώτον, για την τριβή μιας επίπεδης πλάκας του ίδιου μήκους με τη γάστρα και με επιφάνεια ισοδύναμη με την βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας,  $A_S$ . Δεύτερον, για την αντίσταση τριβής που προκαλείται από την καμπυλότητα της γάστρας του πλοίου σε σύγκριση με μια επίπεδη πλάκα (εικόνα 1.4). Το μέγεθος της αντίστασης τριβής αυξάνεται με την ρύπανση της γάστρας, δηλ. από την ανάπτυξη φυκιών, θαλάσσιων οργανισμών και οστράκων .

$$R_F = C_F \times K$$

Η βρεχόμενη επιφάνεια  $A_S$  μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τη σχέση του Mumford. Σαν μια πρώτη προσέγγιση μπορεί να εκτιμηθεί με 15% εύρος ακρίβειας ως εξής:

$$A_S = 1.025 \times L_{PP} \times (C_B \times B + 1.7 \times T) = 1.025 \times \left( \frac{V}{T} + 1.7 \times L_{PP} \times T \right)$$

Η υπόλοιπη αντίσταση  $R_R$  περιλαμβάνει την αντίσταση κυματισμού και την αντίσταση λόγω συνεκτικότητας. Μερικές φορές η πρόσθετη αντίσταση τριβής λόγω της καμπυλότητας της γάστρας του πλοίου περιλαμβάνεται επίσης στην υπόλοιπη αντίσταση.



Η αντίσταση κυματισμού αναφέρεται στην ενέργεια που χάνεται από τη δημιουργία κυμάτων κατά τη διάρκεια της πρόωσης του πλοίου μέσα στο νερό, και συνήθως ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου, θα αποτελέσει το μεγαλύτερο μέρος της υπόλοιπης αντίστασης (εικόνα 1.4).

Η αντίσταση λόγω συνεκτικών δυνάμεων είναι συνήθως ένα μικρό μέρος της συνολικής αντίστασης. Προκύπτει από απώλειες αποκόλλησης στο οριακό στρώμα και από το αυξημένο πάχος αυτού κατά μήκος της πλευράς του πλοίου. Το αποτέλεσμα του αυξημένου πάχους οριακού στρώματος είναι η χαμηλότερη πίεση στην πρυμναία περιοχή του πλοίου από ότι στο πρωραίο, η οποία προκαλεί αντίσταση.

Η δημιουργία δινών όταν η ροή αποκολλάται από την επιφάνεια της γάστρας είναι ένα ειδικό μέρος της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα απώλειες αποκόλλησης, μερικές φορές αναφέρεται ως αντίσταση δινών. Οι δίνες δημιουργούνται τόσο λόγω της αποκόλλησης στο οριακό στρώμα όσο και στην πρυμναίο τμήμα του πλοίου, λόγω των απότομων αλλαγών στην καμπυλότητα.

Η διαδικασία υπολογισμού του ειδικού συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης  $C_R$  περιγράφεται σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία.

$$R_R = C_R \times K$$

Η υπόλοιπη αντίσταση είναι τυπικά πολύ περιορισμένη στις χαμηλές ταχύτητες αλλά μπορεί να γίνει αρκετά σημαντική σε αυξημένες ταχύτητες πλοίων. [9] [8]

### **Αντίσταση αέρα $R_A$**

Όταν ο καιρός είναι καλός, η αντίσταση του αέρα είναι, κατ' αρχήν, ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας του πλοίου και την μετωπική επιφάνεια του πλοίου πάνω από την ίσαλο γραμμή. Είναι σημαντική η διάκριση της αντίστασης του αέρα από την αντίσταση του ανέμου, η αντίσταση του αέρα αντιστοιχεί μόνο στην αντίσταση από τη μετακίνηση του πλοίου μέσω του αέρα χωρίς άνεμο.

Η αντίσταση του αέρα μπορεί, παρόμοια με τις προηγούμενες αντιστάσεις, να εκφραστεί ως  $R_A = C_A \times K_A$ . Χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή οπισθέλκουσας  $C_A$  και μια επιφάνεια του πλοίου πάνω από τη γραμμή ισάλου  $A_{ir}$ , η αντίσταση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$R_A = \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times C_A \times A_{air} \times V^2$$

Συνήθως, ο συντελεστής οπισθέλκουσας μπορεί να εκτιμηθεί σε περίπου.  $C_A \approx 0.9$  ανάλογα με το σχήμα της υπερκατασκευής, ενώ η επιφάνεια πάνω από την ίσαλο γραμμή, στην οποία δρα ο άνεμος, πρέπει να υπολογιστεί επειδή η επιφάνεια εξαρτάται από την κατεύθυνση του ανέμου. [7]

### 1.1.8. Παράμετροι που επηρεάζουν την αντίσταση

Πολλές παράμετροι επηρεάζουν τη συνολική αντίσταση του πλοίου σε ήρεμα νερά και η φύση της επιρροής μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου. Η ακόλουθη ενότητα παρέχει μια επισκόπηση των παραμέτρων που επηρεάζουν και μια σύντομη εισαγωγή στη σχέση τους.

#### Αριθμός Froude

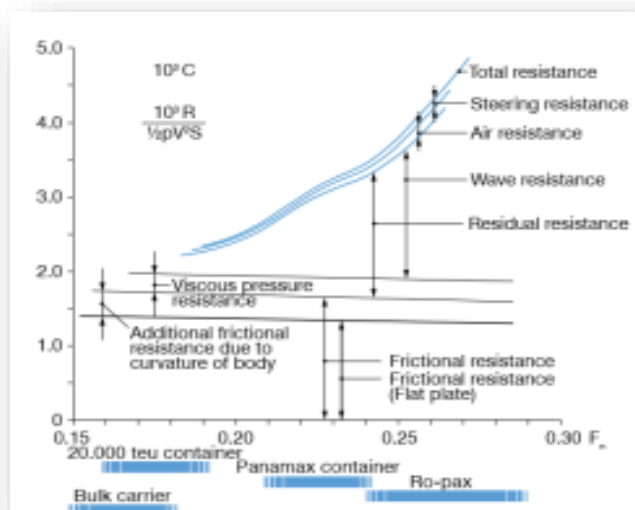
Ο αριθμός Froude είναι ένας αδιάστατος συντελεστής, ιδιαίτερα σημαντικός για την αντίσταση των πλοίων. Τα πλοία με παρόμοιο αριθμό Froude θα βιώσουν σχετικά παρόμοιες αντιστάσεις πηγής (σχέση μεταξύ  $C_F$ ,  $C_R$ ,  $C_A$ ), παρά το γεγονός ότι δεν έχουν το ίδιο μέγεθος και κινούνται σε διαφορετικές ταχύτητες.

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{g \times L_{WL}}}$$

Η συνολική αντίσταση, και συνεπώς η κατανάλωση καυσίμου, αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός Froude. Αυτό συμβαίνει επειδή η αντίσταση των κυματισμών αυξάνεται σημαντικά όταν οι αριθμοί Froude υπερβαίνουν περίπου  $F_n = 0.16$  έως  $0.17$ , όπως φαίνεται στην (εικόνα 1.4) από το διάγραμμα είναι επίσης σαφές ότι η τριβή είναι πρακτικά η μόνη παράμετρος που επηρεάζει σε τιμές  $F_n < 0.15$ .

Από τον τύπο για τον αριθμό Froude, καθίσταται προφανές ότι αυξάνοντας το μήκος του πλοίου, η τιμή του αριθμού Froude θα μειωθεί. Φυσικά, αυτό δεν έρχεται χωρίς κόστος, καθώς αυξάνει την βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου, και επομένως την αντίσταση τριβής. Ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου, αυτή η αύξηση της αντίστασης τριβής μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι ουσιώδης.

Συνήθως, το μήκος του πλοίου είναι η πιο δαπανηρή παράμετρος που προσαρμόζεται σε σχέση με τα κόστη κεφαλαίου, αλλά λαμβάνοντας υπόψη τους κανονισμούς EEDI (energy efficiency design index) μπορεί να είναι απαραίτητο ένα μεγαλύτερο μήκος εάν απαιτείται συγκεκριμένη ταχύτητα για συγκεκριμένη χρήση. Από την άλλη πλευρά, έμφορτα πλοία μεταφοράς κοντέινερ με μεγαλύτερους συντελεστές γάστρας εμφανίζονται σήμερα, καθώς η ταχύτητα τέτοιων πλοίων έχει μειωθεί σημαντικά. [4]



**Εικόνα 1.4** Συνιστώσες της συνολικής αντίστασης ως συνάρτηση του αριθμού Froude. [2]

### **Επίδραση της βρεχόμενης επιφάνειας**

Η βρεχόμενη επιφάνεια είναι υψίστης σημασίας για την αντίσταση τριβής του πλοίου, η οποία φαίνεται να κυμαίνεται σε  $F_n < 0.15$  στην (εικόνα 1.4).

Αυξάνοντας τον συντελεστή γάστρας, η βρεχόμενη επιφάνεια μειώνεται σε σχέση με την ποσότητα φορτίου που μπορεί να μεταφερθεί, για αυτό τα πλοία που ταξιδεύουν σε χαμηλές ταχύτητες, όπως τα δεξαμενόπλοια και τα φορτηγά έχουν υψηλό συντελεστή γάστρας. Η βρεχόμενη επιφάνεια μπορεί να εκτιμηθεί με τον τύπο του Mumford. [4]

### **Επίδραση συντελεστή γάστρας**

Ο συντελεστής γάστρας περιγράφει το συνολικό ωφέλιμο φορτίο της γάστρας. Είναι ένας καλός και εύχρηστος δείκτης της αντίστασης και των δυνατοτήτων της γάστρας σε σχέση με την ταχύτητα. Ωστόσο, οι άλλες παράμετροι που περιγράφονται σε αυτήν την ενότητα μπορεί να έχουν σχετικά μεγαλύτερη επίδραση, ειδικά στην αντίσταση, από τις μικρές αλλαγές στον συντελεστή γάστρας. Γενικά, τα πλοία που κινούνται με υψηλότερη ταχύτητα, για τα οποία οι κυματισμοί είναι η κύρια παράμετρος αντίστασης, απαιτούν μικρούς συντελεστές γάστρας, ενώ τα πιο αργά πλοία, για τα οποία η τριβή έναντι της γάστρας είναι η κύρια παράμετρος αντίστασης, είναι πιο αποτελεσματικά με υψηλότερο συντελεστή γάστρας. [4]

### **Επίδραση του λόγου μήκους προς εκτόπισμα (fineness ratio)**

Ο λόγος μήκους προς εκτόπισμα περιγράφει το μήκος του πλοίου σε σχέση με το εκτόπισμα και επηρεάζει την αντίσταση, ειδικά για ταχύτερα πλοία. Όταν αυξάνεται ο συγκεκριμένος συντελεστής για σταθερό εκτόπισμα, η υπόλοιπη αντίσταση μειώνεται. Ωστόσο, ταυτόχρονα αυξάνεται η βρεχόμενη επιφάνεια. Το βέλτιστο μήκος της συγκεκριμένης γάστρας, με τη συγκεκριμένη ταχύτητα σχεδιασμού του, πρέπει να βρεθεί λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που επιβάλλονται από διόδους καναλιών, λιμάνια, κόστη παραγωγής κ.λπ. [4]

### **Επίδραση πρισματικού συντελεστή**

Ο πρισματικός συντελεστής είναι ένα σημαντικό μέτρο για την περιγραφή του πόσο καλά το πλοίο εκτοπίζει το νερό ενώ κινείται μέσα σε αυτό. Ο πρισματικός συντελεστής επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό με τον αριθμό Froude του πλοίου όπου σε αυτή την περίπτωση συνιστάται η μελέτη εξειδικευμένης βιβλιογραφίας. [4]

### **Πρόσθετη αντίσταση σε διάφορες συνθήκες**

Γενικά, το βάθος του νερού δεν έχει καμία επίδραση στην περίπτωση που είναι περισσότερο από 10 φορές το βύθισμα του πλοίου. Τα ρηχά νερά μπορεί να αυξήσουν σημαντικά την αντίσταση του πλοίου για διάφορους μάλλον λόγους που αναφέρονται παρακάτω.

Η πίεση που δημιουργείται από την κίνηση του πλοίου μέσα στο νερό θα είναι μεγαλύτερη καθώς η ροή του νερού είναι περιορισμένη, επιβραδύνοντας και αυξάνοντας έτσι το μέγεθος του συστήματος κυματισμών που έχει δημιουργηθεί από το πλοίο, και έχει ως αποτέλεσμα πρόσθετη αντίσταση. Αυτό το αποτέλεσμα είναι κυρίως για  $F_n > 0.2$ .

Επιπλέον, το νερό θα ρέει πίσω και γύρω από το πλοίο λόγω του περιορισμού του καναλιού που προκαλείται από την παρουσία του πλοίου. Επίσης, η προπέλα θα απορροφά σε κάποιο βαθμό νερό πιο γρήγορα πέρα από την επιφάνεια του πλοίου από ότι σε βαθιά νερά. Και τα δύο αυτά φαινόμενα αυξάνουν τις ταχύτητες ροής και, συνεπώς, και την αντίσταση.

Επιπλέον, μπορεί να εμφανιστεί το λεγόμενο φαινόμενο της επιβύθισης (squat effect). Κατά το φαινόμενο αυτό η πίεση κάτω από το πλοίο μειώνεται καθώς το περιορισμένο κενό μεταξύ του βυθού και του πλοίου οδηγεί σε τριβή στο νερό κάτω από τη γάστρα. Το αποτέλεσμα είναι ότι το νερό θα ρέει προς τα πλάγια αντί για κάτω από το πλοίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο από το κανονικό βύθισμα και αυξάνει την αντίσταση. Επίσης αυτό φαίνεται κυρίως σε πλοία με αυξημένους αριθμούς Froude. [7]

### **Καιρός και ανοιχτό πέλαγος**

Κύματα που δημιουργούνται από ισχυρούς ανέμους μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην αντίσταση που επιδράει το πλοίο. Ειδικά εάν το μήκος του πλοίου και το μήκος κύματος είναι περίπου ίσο.

Τα κύματα θα θέσουν το πλοίο σε κίνηση και θα οδηγήσουν σε πρόσθετη αντίσταση καθώς περισσότερο νερό επηρεάζεται από την κίνηση του πλοίου. Επιπλέον, τα κύματα από τη θάλασσα θα ανακλώνται στη γάστρα, και έτσι θα αυξάνουν την αντίσταση.

Σε συνδυασμό, αυτό ονομάζεται κυματική δύναμη εκτροπής (wave drift force). Η επίδραση αυτού μπορεί να φανεί εάν ένα αντικείμενο επιπλέει ελεύθερα στα κύματα. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο θα κινηθεί αργά προς την κατεύθυνση της διάδοσης των κυμάτων.

Επιπλέον, οι διορθώσεις με το πηδάλιο θα απαιτούνται πολύ πιο συχνά για να παραμείνει το πλοίο στην πορεία. Η χρήση του πηδαλίου φυσικά θα έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη αντίσταση, με επίδραση κυρίως στα μικρά πλοία ( $L_{PP} < 135 \text{ m} \approx 20.000 \text{ dwt}$ ) λόγω της χαμηλότερης σταθερότητας τους ως προς την κατεύθυνση. Επιπλέον, το σχήμα του άξονα πηδαλίου μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ικανότητα του πλοίου να «κόβει» την ανοικτή θάλασσα. [7]

### **Καιρός και άνεμος**

Είναι σημαντικό να γίνει διευκρίνηση μεταξύ αντίστασης αέρα και ανέμου. Η αντίσταση του αέρα αντιστοιχεί μόνο στην ήρεμη καιρική αντίσταση από τη μετακίνηση του πλοίου στην ατμόσφαιρα χωρίς άνεμο. Η αντίσταση του ανέμου υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως η αντίσταση του αέρα αλλά λαμβάνει υπόψη τη συνδυασμένη ταχύτητα του πλοίου και του ανέμου.

Για μεγάλα πλοία που ταξιδεύουν στον ωκεανό, η αντίσταση του ανέμου θα είναι κατά κανόνα σημαντικά χαμηλότερη από την κυματική αντίσταση, αλλά για πλοία που προορίζονται για ταξίδια σε νερά χωρίς μεγάλη κυματική αντίσταση, π.χ. επιβατικά, η αντίσταση ανέμου μπορεί να είναι η πιο σημαντική προστιθέμενη αντίσταση σε ακραίες καιρικές συνθήκες. [7]

### **Ρύπανση**

Η ρύπανση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της αντίστασης τριβής. Έχουν παρατηρηθεί ακραίες περιπτώσεις όπου η ρύπανση είχε αυξήσει την αντίσταση τριβής έως και 100% ενώ τυπικά κυμαίνεται στο εύρος 20-30%. Πριν ο IMO απαγορεύσει το TBT (tributyl tin), ένα τοξικό βιοκτόνο συστατικό, για τις νέες εφαρμογές από το 2003 και μετά καθώς και την πλήρη απαγόρευση από το 2008, η θαλάσσια ανάπτυξη οργανισμών πάνω στη γάστρα ήταν πιο αργή, αλλά το TBT απαγορεύτηκε καθώς είναι εξαιρετικά τοξικό για το θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση του πλοίου σε σχέση με την συντήρηση των βυθισμένων τμημάτων του πλοίου, τον καθαρισμό της γάστρας και τη στίλβωση της προπέλας και επίσης ότι το κόστος καθαρισμού και το κόστος της προστιθέμενης κατανάλωσης καυσίμου λόγω ρύπανσης πρέπει να είναι ισορροπημένο.

Κατά το σχεδιασμό του πλοίου, ειδικά για ταξίδια σε θερμότερες θάλασσες όπου η ανάπτυξη οργανισμών είναι γρήγορη, πρέπει να ληφθεί υπόψη η παρουσία και η επίδραση της ρύπανσης.

Παρόμοια με την ρύπανση, η αυξημένη τραχύτητα της γάστρας με την πάροδο του χρόνου, που προκύπτει από βαθουλώματα από αλληλεπιδράσεις με την αποβάθρα, κ.λπ., θα αυξήσει την αντίσταση της γάστρας. [7]

### **Πάγος**

Τα πλοία που πλέουν σε πάγο αντιμετωπίζουν σημαντικά υψηλότερη αντίσταση τριβής. Ο σχεδιασμός για αυτές τις συνθήκες είναι ένας πολύ ειδικός τομέας. Ένα εκτεταμένο διάγραμμα φορτίου κινητήρα μπορεί να είναι χρήσιμο για τα πλοία ειδικά στον πάγο. [7]

### **Περιθώρια αντίστασης σε μειωμένη ταχύτητα πλεύσης**

Για να ληφθούν υπόψιν οι καιρικές συνθήκες μια μέσης περίπτωσης, ένα σχετικό περιθώριο αντίστασης (sea margin) προστέθηκε στην απαίτηση ισχύος για την πρόωση του πλοίου σε ήρεμα νερά με την ταχύτητα σχεδιασμού. Πρόσφατα μειώθηκαν οι ταχύτητες σχεδιασμού των πλοίων ως αποτέλεσμα της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό οδήγησε σε χαμηλότερη απαίτηση ισχύος και, συνεπώς, σε μικρότερους κινητήρες. Εάν τα περιθώρια σχετικής αντίστασης εφαρμόζονται σε αυτούς τους μικρότερους κινητήρες, το περιθώριο ισχύος που προκύπτει θα είναι επίσης μικρότερο.

Ωστόσο οι καιρικές συνθήκες που θα αντιμετωπίσει το πλοίο θα είναι ίδιες είτε έχει κατασκευαστεί για υψηλές ή αργές ταχύτητες λειτουργίας. Η απόλυτη προστιθέμενη αντίσταση που παρατηρείται στη γάστρα θα είναι η ίδια. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό για τον σχεδιαστή του πλοίου να εξετάσει τα περιθώρια αντίστασης για το συγκεκριμένο έργο. Ο σχεδιαστής πρέπει να διασφαλίσει ότι ο επιλεγμένος κινητήρας μπορεί να διασφαλίσει ασφαλή ελιγμό σε όλες τις σχετικές συνθήκες και ότι όλα τα σχετικά σημεία λειτουργίας (ισχύς, rpm) για την προπέλα βρίσκονται μέσα στο διάγραμμα φόρτωσης του κινητήρα. [7]

## **1.2. Συστήματα πρόωσης**

Ένα σύστημα πρόωσης αποτελείται από τρία μέρη: μια πηγή ενέργειας (μεταφέρεται στο πλοίο ως ενέργεια καυσίμου, ή συλλέγεται από το εξωτερικό περιβάλλον ως αιολική ή ηλιακή ενέργεια), έναν κινητήρα που την μετατρέπει σε μηχανική μορφή και τέλος καταλήγει στον προωστήρα ή τον προωθητήρα (που ωθεί στο περιβάλλον νερό προς τα πίσω με αποτέλεσμα την κίνηση του πλοίου). Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος πρόωσης για ένα συγκεκριμένο σκάφος είναι μια περίπλοκη διαδικασία, η οποία απαιτεί γνώση και εμπειρία. Για να γίνει κατανοητό πόσο σημαντική είναι η σωστή επιλογή του συστήματος πρόωσης, πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος της εγκατάστασης μπορεί να φτάσει το 25% του συνολικού κόστους του πλοίου. Ωστόσο, το κόστος της λειτουργίας μπορεί να ξεπεράσει ακόμη και το κόστος της εγκατάστασης στα σε μικρό χρονικό διάστημα.

Η παραπάνω διαπίστωση καθιστά προφανές ότι η επιλογή ενός συστήματος πρόωσης με χαμηλό κόστος λειτουργίας είναι πιο σημαντική από την επιλογή ενός συστήματος με χαμηλό κόστος κατασκευής.

Οι βασικές απαιτήσεις, οι οποίες σχετίζονται με το σύστημα πρόωσης, είναι οι εξής:

- Πρέπει ιδανικά να καταλαμβάνει όσο τον δυνατόν λιγότερο χώρο και να έχει όσο το δυνατόν λιγότερο βάρος.
- Το κόστος για τη λειτουργία και τη συντήρησή του πρέπει να είναι το χαμηλό.
- Πρέπει να είναι σε θέση να καταναλώνει καύσιμο χαμηλής ποιότητας, χωρίς σημαντικές συνέπειες στην αξιοπιστία της λειτουργίας και το κόστος συντήρησης.

- Η εγκατάσταση πρέπει να είναι όσο πιο απλή μπορεί, για την αύξηση της αξιοπιστίας και τη μείωση του κόστους συντήρησης.
- Η εγκατάσταση πρέπει να λειτουργεί με μικρό αριθμό εκπαιδευμένου προσωπικού.
- Η εγκατάσταση πρέπει να παρέχει ισχύ στην προπέλα με τον καλύτερο τρόπο για το σχεδιασμό του πλοίου, παράλληλα με την καταλληλότερη ταχύτητα και ροπή.
- Το κόστος κατασκευής πρέπει να είναι το χαμηλό.

Σήμερα, η τεχνολογία και η γνώση των συστημάτων πρόωσης βρίσκονται σε ικανοποιητικό επίπεδο, οπότε υπάρχουν διάφορες επιλογές και δυνατότητες. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί, ότι το σύστημα πρόωσης για τα πλοία επιλέγεται με βάση ένα συγκεκριμένο «άγραφο» πρωτόκολλο που έχει σχέση με τον τύπο του πλοίου. Στα ακόλουθα κεφάλαια παρουσιάζονται τα κύρια συστήματα πρόωσης και το πιο δημοφιλές σύστημα στη ναυτική πρόωση. [9]

### **1.3. Βασικά μέρη συστημάτων πρόωσης**

Τα βασικά μέρη ενός συστήματος πρόωσης αποτελείται από τον κινητήρα που είναι η κύρια πηγή παραγωγής ισχύς, η οποία μεταφέρεται στην προπέλα μέσω ενός άξονα στην άκρη του οποίου βρίσκεται η προπέλα. Πριν τον προπελοφόρο άξονα υπάρχει ο ενδιάμεσος άξονας (ή περισσότεροι) ο οποίος πραγματοποιεί την σύνδεση της ατράκτου με τον στροφαλοφόρο άξονα της μηχανής. Σε πλοία με κινητήρες 2-χρόνων diesel ο ενδιάμεσος άξονας συνδέεται απευθείας στον στροφαλοφόρο του κινητήρα. Στην περίπτωση κινητήρων 4-χρόνων diesel υπάρχει η ανάγκη μείωσης στροφών επομένως παρεμβάλλεται και ο κατάλληλος μειωτήρας στροφών. Μάλιστα, επισημαίνεται ότι ορισμένα σύγχρονα σκάφη διαθέτουν ένα σύστημα diesel-ηλεκτρικής ενέργειας στην οποία η προπέλα περιστρέφεται από έναν ηλεκτροκινητήρα, που τροφοδοτείται από τις γεννήτριες του πλοίου μέσω της σύνδεσης του με τους πετρελαιοκινητήρες. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, οι ατμομηχανές χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά για το σκοπό αυτό, αλλά έχουν αντικατασταθεί ως επί το πλείστον από δίχρονους ή τετράχρονους κινητήρες diesel, εξωλέμβιους κινητήρες και κινητήρες αεριοστρόβιλων σε ταχύτερα πλοία. Από την άλλη, οι πυρηνικοί αντιδραστήρες που παράγουν ατμό χρησιμοποιούνται για την προώθηση πολεμικών πλοίων και παγοθραυστικών, και έχουν γίνει προσπάθειες στο παρελθόν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία των εμπορικών πλοίων.

Επιπρόσθετα, εκτός από τις προπέλες σταθερού και ελεγχόμενου βήματος που χρησιμοποιούνται καθιερωμένα, υπάρχουν πολλές εξειδικευμένες παραλλαγές, όπως οι προπέλες με αντίστροφη περιστροφή και ακροφύσιο. Τα περισσότερα σκάφη έχουν μια μονή προπέλα, αλλά μερικά μεγάλα σκάφη μπορεί να έχουν έως και τέσσερις προπέλες συμπληρωμένες με εγκάρσιες προωθητήρες για ελιγμούς σε λιμάνια [10]

## 2. Η ΚΥΡΙΑ ΙΣΧΥΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΩΣΗΣ

### 2.1. Λειτουργία συστημάτων πρόωσης

Η κύρια λειτουργία οποιουδήποτε κινητήρα ναυπηγικής μηχανής αποτελεί μία μετατροπή της χημικής ενέργειας ενός καυσίμου σε ωφέλιμο έργο και η χρήση αυτού του έργου λειτουργεί προς όφελος της πρόωσης του πλοίου. Στην συνέχεια, μια μονάδα προώθησης αποτελείται από μηχανήματα, εξοπλισμό και χειριστήρια, τα οποία συνδέονται μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά με μια άτρακτο πρόωσης. Ως εκ τούτου, υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι προωστικών μονάδων που χρησιμοποιούνται στο ναυτικό και η ισχύς μεταδίδεται από τη μονάδα προώθησης στην προπέλα του πλοίου μέσα από τη χρήση γραναζιών, ατράκτων και συμπλεκτών.

Επιπλέον, ένα πλοίο κινείται μέσω του νερού χρησιμοποιώντας μηχανικά εξαρτήματα, όπως είναι η προπέλα, ως προς την κατεύθυνση επιλογής. Η προπέλα προσδίδει ταχύτητα σε μια στήλη νερού και την κινούν στην αντίθετη κατεύθυνση για να μετακινήσουν το πλοίο. Μια δύναμη, που ονομάζεται δύναμη αντίδρασης, αναπτύσσεται έναντι της προπέλας. Αυτή η δύναμη, που ονομάζεται επίσης ώθηση, μεταδίδεται στο πλοίο και αναγκάζει το πλοίο να κινείται στο νερό. Η προπέλα αποτελεί μία διάταξη πρόωσης που χρησιμοποιείται σε όλα σχεδόν τα ναυτικά πλοία. Η ώθηση που αναπτύσσεται σε αυτήν μεταδίδεται στη δομή του πλοίου από τον κύριο άξονα μέσω του εδράνου ώθησης.

Κατά συνέπεια, ο κύριος άξονας εκτείνεται από τον κύριο άξονα του μειωτήρα προς την προπέλα, όπου υποστηρίζεται και συγκρατείται ευθύγραμμα από τα ελατήρια, τα έδρανα κοντά στο σημείο της πρύμνης και το έδρανο ώθησης. Η ώθηση, που ενεργεί στον άξονα πρόωσης ως αποτέλεσμα του φαινομένου ώθησης την προπέλας, μεταδίδεται στη δομή του πλοίου από το κύριο έδρανο ώθησης. Στα περισσότερα πλοία, το κύριο έδρανο ώθησης βρίσκεται στο εμπρόσθιο άκρο του κύριου άξονα μέσα στο κύριο περίβλημα μειωτήρα. Σε ορισμένα πολύ μεγάλα πλοία, ωστόσο, το έδρανο ώθησης του κύριου άξονα βρίσκεται πιο πίσω στον χώρο του μηχανοστασίου ή στην ακτίνα ενός περιφραγμένου χώρου του άξονα προπέλας.

Τέλος, ο κύριος μειωτήρας συνδέει τον πρωτεύοντα κινητήρα με τον άξονα, ενώ η λειτουργία του κύριου μειωτήρα αφορά στη μείωση των υψηλών στροφών του κινητήρα και παράλληλα επιτρέπει στην προπέλα να λειτουργεί σε χαμηλότερες στροφές. Με αυτόν τον τρόπο, τόσο ο κινητήρας όσο και ο άξονας της προπέλας περιστρέφονται στις πιο αποτελεσματικές ταχύτητες. [10]

### 2.2. Πηγής ενέργειας

Μια σύντομη ομαδοποίηση μπορεί να είναι ως εξής [12]:

- Προ-βιομηχανική παραγωγή ισχύος, συνήθως ανθρώπινη κωπηλασία, αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί και ιππήλατα πλοία.
- Συλλογή ισχύος από το περιβάλλον, αιολική ενέργεια (ιστία), ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά). Η ηλεκτρική πρόωση πλοίων αναφέρεται σε προπέλες οδηγούμενες από ηλεκτρικό κινητήρα, με ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από θερμικές μηχανές και όχι απευθείας από ηλεκτρικές πηγές, όπως μπαταρίες ή ηλιακούς συλλέκτες, που χρησιμοποιούνται σε ορισμένα μικρά σκάφη και στα περισσότερα μικρά υποβρύχια σκάφη.

- Τα χημικά καύσιμα που μεταφέρονται πάνω στο πλοίο, συνήθως ένα υγρό καύσιμο παράγωγο πετρελαίου, εκμεταλλεύονται το οξυγόνο του αέρα που υπάρχει στο περιβάλλον. Το diesel είναι μακράν το πιο χρησιμοποιημένο καύσιμο.
- Πυρηνικά καύσιμα, που χρησιμοποιούνται μόνο σε πυρηνικά υποβρύχια, χρησιμοποιώντας πολύ εμπλουτισμένο καύσιμο (>20% U-235) σε αντιδραστήρες σχάσης, συνήθως τύπου πεπιεσμένου νερού (Pressurised Water Type - PWR), πάντα μέσω ατμοστροβίλων.

Στα πρώτα σκάφη το κύριο μέσο πρόωσης ήταν τα κουπιά και ο άνεμος, αλλά είναι προφανές ότι ο άνεμος έχει μια πολύ σημαντική επίδραση ώθησης, και για αυτόν το λόγο προήλθε το ιστίο (πανί). Υπάρχουν ενδείξεις ιστιοπλοϊκών σκαφών και ξύλινων κουπιών στη Μέση Ανατολή που χρονολογούνται από το 5000 π.Χ. και, στην αρχαία Αίγυπτο από το 3000 π.Χ.. Ο Νείλος ήταν η κύρια μεταφορική οδός, η οποία εκμεταλλευόταν το καθοδικό ρεύμα του νερού και των επικρατέστερων ανοδικών Βόρειων ανέμων.

Η ιστιοπλοΐα απαιτεί μεγάλη εμπειρογνώσια σε ποικίλες συνθήκες ανέμου και θάλασσας, μερικές φορές με εξαιρετική διορατικότητα (π.χ. πώς θα γίνει επιστροφή στο λιμάνι), και οι δύο πρωτοπόροι, ο Κολόμβος στον Ατλαντικό και ο Urdaneta στον Ειρηνικό, αξιοποίησαν τους ανατολικούς ανέμους σε χαμηλά γεωγραφικά πλάτη και τους δυτικούς ανέμους σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη, μαζί με τα ωκεάνια ρεύματα (ωρολογιακά στο βόρειο ημισφαίριο), για τη σύνδεση πληθυσμών απομακρυσμένων ηπείρων και την εγκαθίδρυση μόνιμων διαδρομών για θαλάσσιο εμπόριο. [13]

Η πλειοψηφία των θαλάσσιων σκαφών (όπως και κάθε άλλος τύπος οχήματος εδάφους, αέρα ή διαστήματος) τροφοδοτείται επί του παρόντος από ένα υγρό καύσιμο που είναι αποθηκευμένο στο σκάφος και από μια θερμική μηχανή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια της καύσης αυτού του καυσίμου με τον οξειδωτή, στην απαιτούμενη μηχανική ενέργεια για να εκτελεστεί η διαδικασία της πρόωσης. Ως εκ τούτου, η πρόωση είναι πάντα ένα μηχανολογικό αποτέλεσμα. [12]

### 2.3. Είδη μηχανών

Μια σύντομη ομαδοποίηση, λίγο πολύ με χρονολογική σειρά, συμπεριλαμβανομένης της κωπηλασίας και της ιστιοπλοΐας μπορεί να είναι ως εξής [11]:

- Μηχανική μετάδοση από την πηγή ενέργειας στον προωθητήρα, π.χ. από την ανθρώπινη χρήση κουπιών
- Ιστιοπλοΐα, δηλαδή πρόωση μέσω αιολικής ενέργειας που εφαρμόζεται σε εκτεταμένες επιφάνειες (πανιά).
- Ατμομηχανή, μηχανή εξωτερικής καύσης, που λειτουργεί σε κύκλο Rankine, με νερό ως εργαζόμενο μέσο, που χρησιμοποιήθηκε σχεδόν σε όλα τα πλοία του 19ου αιώνα, αρχικά με παλινδρομικά έμβολα και αργότερα με στροβίλους (το πρώτο το 1897 με το ατμόπλοιο Turbinia), και σε λίγα πλοία από τότε (σε μερικά πολύ μεγάλα πλοία και σε πυρηνικά υποβρύχια). Το όνομα των ατμόπλοιων συχνά προτίθεται με SS (Steam Ships).
- Κινητήρας diesel, μια μηχανή εσωτερικής καύσης (internal combustion engine - ICE), που λειτουργεί σε έναν κύκλο diesel, χρησιμοποιώντας diesel ή βαρύ καύσιμο μαζούτ, και ενσωματώνεται στα περισσότερα πλοία από το 1930. Είναι επίσης γνωστά ως μηχανοκίνητα



πλοία. Οι κινητήρες diesel είχαν περιορισμένη ισχύ για πολλές δεκαετίες, αλλά πλέον δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός, με τους MAN / B&W και Wärtsilä - Sulzer ως τους μεγαλύτερους κατασκευαστές κινητήρων. Το όνομα των μηχανοκίνητων πλοίων προτίθεται συχνά με MS (Motor Ships).

- Ο αεριοστρόβιλος, μια μηχανή εσωτερικής καύσης (ICE), που λειτουργεί σε έναν κύκλο Brayton, προερχόμενος από αεροπορικούς στροβίλους, ικανός να καταναλώνει diesel, κηροζίνη ή καύσιμο αεριοθεωμένων, χρησιμοποιείται σε ορισμένα γρήγορα πλοία (π.χ. υδροπτερυγα), πολεμικά πλοία (για την άμεση ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων), και μεγάλα κρουαζιερόπλοια. Το πρώτο επιβατικό πλοίο που χρησιμοποίησε αεριοστρόβιλο ήταν το GTS Finnhjet, που κατασκευάστηκε το 1977. Τέσσερα χρόνια αργότερα, κινητήρες diesel προστέθηκαν για τη μείωση του κόστους καυσίμου και έτσι έγινε το πρώτο πλοίο με συνδυασμένη πρόωση diesel-ηλεκτρικού και αερίου (combined diesel and gas - CODAG).
- Κινητήρες διπλού καυσίμου, ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης που λειτουργεί σε έναν κύκλο diesel, που χρησιμοποιεί υγροποιημένο φυσικό αέριο (liquefied natural gas - LNG) ως κύριο καύσιμο. Μερικές φορές λειτουργεί σε λειτουργία διπλού καυσίμου με μερική έγχυση diesel.
- Βενζινοκινητήρες (ICE), που χρησιμοποιούνται σε μικρούς εξωλέμβιους κινητήρες.
- Ηλεκτρικοί κινητήρες που μπορούν να τροφοδοτούνται από:
  1. Ηλεκτρικές μπαταρίες όπως στα μοντέλα πλοίων και υποβρυχίων.
  2. Μηχανές diesel, ο συνδυασμός μιας μεγάλης πηγής ισχύος (ICE) που κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια η οποία συνδέεται με τους ηλεκτρικούς κινητήρες που οδηγούν τις προπέλες, είναι πολύ εύχρηστος παρά το επιπλέον κόστος του. Τα περισσότερα μεγάλα πλοία, ιδιαίτερα τα κρουαζιερόπλοια, χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες σε άτρακτο που ονομάζονται προωθητήρες αζιμούθιου για να επιτρέπουν περιστροφή 360°, καθιστώντας τα πλοία αυτά πολύ πιο ευκίνητα.
  3. Φωτοβολταϊκά πάνελ (για την πρόωση μικρών πλοίων).
  4. Κυψέλες καυσίμου, που προσφέρουν ανεξάρτητη από τον αέρα, πρόωση (air independent propulsion - AIP) στα γερμανικά υποβρύχια τύπου 212 από το 1998, βασισμένα σε κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane fuel cells - PEMFC) με περίπου 250 kW συνολικής ισχύς.

Άλλες PEM-FC χρησιμοποιούνται σε βοηθητικές μονάδες ισχύος σε πλοία, και πιο ισχυρές κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας τηγμένου ανθρακικού (molten carbonate fuel cells - MCFC) και στερεού οξειδίου (solid oxide fuel cells - SOFC) εξετάζονται για γενική και ειδική πρόωση πλοίου (π.χ. πλοία με καύσιμο υδρογόνου), σε συνδυασμό με κάποιον κύκλο ανάκτησης θερμότητας, «αυξάνοντας» τον υβριδικό τύπο μηχανής (η πρώτη υβριδική πρόωση ήταν με πανιά και ατμό, ακολουθούμενη από τους συνδυασμούς diesel-ηλεκτρικό και CODAG).

Η πρώτη μηχανή που εφαρμόστηκε για μηχανική πρόωση (στην ξηρά και στο νερό) ήταν η ατμομηχανή που, μετά από κάποιες δοκιμές ήδη από το 1770, εξαπλώθηκε το 1815 με την πρώτη διέλευση του αγγλικού καναλιού από το ατμόπλοιο Elise. Ο πρώτος προωθητήρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο ατμοκίνητος τροχός (paddle wheel), όπου ένας αριθμός πτερυγίων τοποθετείται γύρω από την περιφέρεια ενός μερικώς βυθισμένου τροχού.

Το πρώτο οδηγούμενο ατμόπλοιο, ήταν το Little Juliana του Stevens, το 1811, το οποίο ήταν το πρώτο επιβατηγό, που διέσχισε τον ποταμό Χάντσον. Το 1880, το αμερικανικό επιβατικό ατμόπλοιο Κολούμπια έγινε το πρώτο πλοίο που χρησιμοποίησε λαμπτήρες πυρακτώσεως, που τροφοδοτούνταν από ένα δυναμό. Αυτή ήταν η πρώτη εφαρμογή του φωτισμού πυρακτώσεως, πριν από τον πρώτο δημόσιο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Έντισον το 1882, και αμέσως μετά τον Έντισον τιθάσευσε την τεχνολογία του εργαστηρίου του το 1878 . [15]

Ο κύριος κινητήρας βρίσκεται στο μηχανοστάσιο, ένα από τα μεγαλύτερα και πιο περίπλοκα τμήματα των πλοίων, και το πιο θορυβώδες. Βρίσκεται συνήθως στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, για να ελαχιστοποιηθεί το μήκος μεταξύ της ατράκτου και της προπέλα (στην πρύμνη), αν και η αυξημένη χρήση των υβριδικών συστημάτων έχει απελευθερώσει αυτόν τον περιορισμό. Στα μεγάλα πλοία υπάρχουν πολλά μηχανοστάσια και βοηθητικοί χώροι κινητήρα.



**Εικόνα 2.1** α) Η μεγαλύτερη μηχανή diesel στον κόσμο, RTA96-C β) Το μηχανοστάσιο ενός πλοίου. [15]

Ως παράδειγμα μεταβατικών περιόδων στη ναυτική πρόωση, μπορούν να θεωρηθούν τα δύο κρουαζιερόπλοια QM και QM2. Το RMS Queen Mary ήταν ένα υπερωκεάνιο ατμόπλοιο 2139 ατόμων, που κατασκευάστηκε το 1936 και αποσύρθηκε το 1967. Το προωθητικό του σύστημα απόδιδε 120 MW (για πρόωση και ξενοδοχειακές μονάδες) από 24 λέβητες Yarrow που τροφοδοτούσαν 4 στρόβιλους Parson, καθένας από τους οποίους ήταν συνδεδεμένος με μια προπέλα μέσω ενός άξονα, με ταχύτητα λειτουργίας 15 m/s. Το RMS Queen Mary 2, που κατασκευάστηκε το 2003, είναι διατλαντικό υπερωκεάνιο (το μοναδικό εν ενεργεία, μεταξύ Σαουθάμπτον και Νέας Υόρκης) με χωρητικότητα 2620 άτομα. Στα 117 MW της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος συνεισφέρουν τέσσερις πετρελαιοκινητήρες (Wärtsilä 16V 46C-CR) των 16.8 MW ο καθένας με 500 rpm που λειτουργούν σε τετράχρονο κύκλο και δύο αεριοστρόβιλοι (GE LM2500 +) των 25 MW ο καθένας, με περιστροφή στρόβιλου 3600 rpm, ειδική κατανάλωση καυσίμου  $c_{sp} = 159 \text{ g/kWh}$  και 38% θερμική απόδοση. Χρησιμοποιεί ηλεκτρικές γεννήτριες και ηλεκτρικούς κινητήρες για πρόωση (το πρώτο επιβατηγό πλοίο με ενσωματωμένη ηλεκτρική πρόωση), με τέσσερις προπέλες σε άτρακτο διαμέτρου 6m που περιστρέφονται με 144 rpm (οι εμπρόσθιες προπέλες σταθερές και οι δύο οπίσθιες με δυνατότητα περιστροφής 360° στο αζιμούθιο, αφαιρώντας την ανάγκη για πηδάλιο), καθένας από 21.5 MW (Rolls - Royce / Alstom Mermaid), με πέντε πτερύγια βιδωμένα ξεχωριστά. Οι αεριοστρόβιλοι δεν στεγάζονται στο μηχανοστάσιο ή κοντά σε αυτό, βαθιά μέσα στη γάστρα, αλλά αντίθετα βρίσκονται σε ένα ηχομονωμένο περίβλημα ακριβώς κάτω από τη χοάνη, για να μειωθούν οι παρεμβολές λόγω του αέρα. Η ταχύτητα λειτουργίας είναι 15 m/s.



**Εικόνα 2.2** α) RMS Queen Mary β) RMS Queen Mary 2 [39] [40]

Η μονάδα πρόωσης ενός πετρελαιοκίνητου πλοίου είναι παρόμοια με μια κλασσική μονάδα diesel (όπως χρησιμοποιείται στη συμπαραγωγή και την τροφοδοσία ισχύος έκτακτης ανάγκης), με ένα ευρύ φάσμα ισχύος άξονα: από 10 MW έως 100 MW. Χρησιμοποιούν diesel ή μαζούτ (heavy fuel oil - HFO) όταν οι εκπομπές θείου είναι ανεκτές (το μαζούτ έχει το μισό κόστος από το κοινό diesel) . Όσο μεγαλύτερο το πλοίο, τόσο μικρότερο το σύστημα κινητήρα π.χ. η μεγαλύτερη παλινδρομική μηχανή μπορεί να αποδώσει 7 MW ανά κύλινδρο, ο οποίος έχει διαμέτρημα  $D = 1\text{m}$ , μήκος  $L = 4\text{m}$  και λειτουργεί με 60 rpm στον δίχρονο κύκλο, με ευθύγραμμη σάρωση (uniflow scavenging) και απόδοση  $\eta = 54\%$  (BSFC = 155 g/kWh). Οι αργοί κινητήρες περιστρέφονται με  $< 200\text{ rpm}$ , οι κινητήρες μεσαίας ταχύτητας με 200-1000 rpm και οι γρήγοροι κινητήρες με  $> 1000\text{ rpm}$  (σε τετράχρονο κύκλο, με περίπου 100 kW ανά κύλινδρο) . [15]

Όταν το φορτίο του πλοίου είναι ένα καύσιμο (δεξαμενόπλοια πετρελαίου, πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένο φυσικό αέριο, LNG, ή υγροποιημένο αέριο πετρελαίου, LPG) θα μπορούσε αυτό να χρησιμοποιηθεί για την πρόωση του πλοίου, αλλά σπάνια γίνεται λόγω της τιμής (το μαζούτ είναι πολύ φθηνότερο από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο). Ωστόσο, τα πλοία που μεταφέρουν LNG συνηθίζονται να προωθούνται από αεριοστρόβιλους για να είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν εκτός από το βαρύ μαζούτ, το 0.1% της μάζας του φορτίου κάθε μέρα, λόγω της εξάτμισης του κρυογονικού LNG, επειδή ήταν ασύμφορη οικονομικά η εκ νέου υγροποίησή του.

Η τυπική ισχύς του κινητήρα LNG είναι περίπου 25.30 MW, για πλεύση στα 10 m/s , χρησιμοποιώντας περίπου 50/50 της μάζας του μαζούτ και του φυσικού αερίου σε ταξίδι με φορτίο και περίπου 80/20 σε ταξίδι χωρίς φορτίο (κάποιο LNG πρέπει να παραμείνει ακόμη και όταν το πλοίο βρίσκεται υπό έρμα, για να διατηρήσει τις κρυογονικές θερμοκρασίες).

Τα σύγχρονα πλοία που μεταφέρουν LNG χρησιμοποιούν έναν κινητήρα diesel διπλού καυσίμου (χρησιμοποιώντας diesel ή φυσικό αέριο σε έναν τετράχρονο κινητήρα) και ηλεκτρικά οδηγούμενες προπέλες. Η απόδοση του κινητήρα (περίπου 40% για το diesel έναντι 30 % για τον αεριοστρόβιλο) το καθιστά πιο οικονομικό.



**Εικόνα 2.3** α) Μηχανοκίνητο LNG από ατμοστρόβιλους των 32 MW β) Σχηματικό ενός LNG των 40 MW με ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης διπλού καυσίμου (ABB). [15]

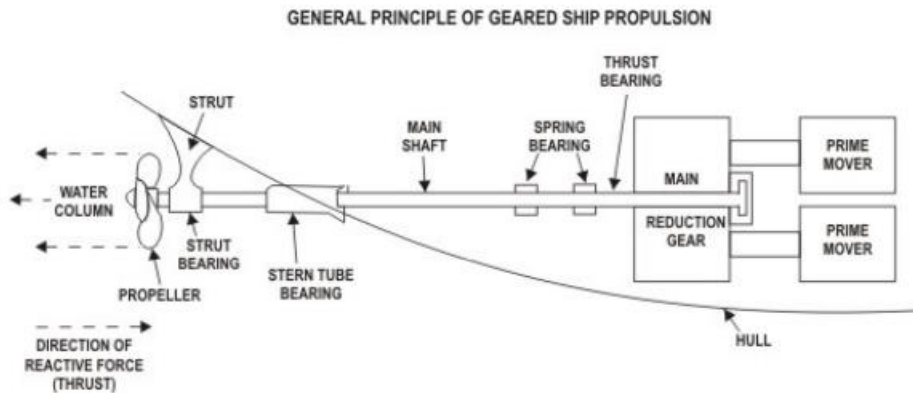
## 2.4. Είδη προωθητήρων

Μια σύντομη ομαδοποίηση μπορεί να είναι (με χρονολογική σειρά ανάπτυξης) ως εξής:

- Κουπιά, συμπεριλαμβάνοντας τα κωπηλατικά κουπιά και τους υδροτροχούς
- Ιστία, ή καλύτερα αλληλεπίδραση ιστίων-τρόπιδας διότι χωρίς υδροδυναμική άνωση, η αεροδυναμική άνωση στα πανιά δεν θα μπορούσε ποτέ να προκαλέσει την πλεύση του πλοίου αντίθετα στον άνεμο. Η πλεύση του σκάφους κόντρα στην κατεύθυνση του ανέμου απαιτεί συντονισμό των δυνάμεων του αέρα στο πανί με τις υδάτινες δυνάμεις στην τρόπιδα και το πηδάλιο, και ελιγμούς αναστροφής (tacking) δηλαδή ακολουθώντας μια πορεία ζγκ ζαγκ.
- Προπέλες σε σχήμα "κοχλία", μακράν οι πιο χρησιμοποιούμενες, είτε από χαλκό, ανοξείδωτο χάλυβα, ή ενισχυμένα με ίνες πολυμερή για μικρές εργασίες.

Διαφορετικοί τύποι είναι :

- Προπέλες σταθερού βήματος (fixed pitch)
- Προπέλες ρυθμιζόμενου βήματος (variable pitch)
- Προπέλες σε δακτύλιο (ducted)
- Προπέλες αζιμούθιου (azimuth)
- Ακροφύσια εκτόξευσης νερού, χρησιμοποιούμενες σε πολλά γρήγορα πλοία, είτε τροφοδοτούμενες από αεριοστρόβιλους είτε από κινητήρες diesel. Ο παραδοσιακός σύνδεσμος μεταξύ του κύριου κινητήρα του πλοίου και της προπέλας είναι μέσω της ατράκτου, που στηρίζεται και διατηρείται ευθυγραμμισμένος από τα έδρανα ελατηρίου (spring bearing), τα έδρανα κοντά στο σημείο της πρύμνης (stern tube bearing) και το έδρανο στήριξης (strut bearing).



**Εικόνα 2.4** Σχηματικό της μηχανικής μετάδοσης στην προώθηση πλοίου. [14]

Οι περισσότερες προπέλες για ναυτική πρόωση, είναι τύπου κοχλία, με τρία, τέσσερα ή πέντε πτερύγια στα μεγαλύτερα σκάφη (τα τέσσερα είναι τα πιο συνηθισμένα), και ταχύτητες προώθησης 10-20m/s, με μέγιστη τιμή τα 50m/s.

Να σημειωθεί ότι οι προπέλες πλοίων βρίσκονται στο πίσω μέρος, ενώ στα αεροσκάφη βρίσκονται στο μπροστινό τμήμα. Ο λόγος έγκειται στις διαφορετικές ταχύτητες. Το πηδάλιο βρίσκεται πίσω από τις προπέλες για να είναι αποτελεσματικό σε χαμηλές ταχύτητες πρόωσης και να επιτρέπει ελιγμούς (αν και τα μεγάλα πλοία μπορεί να έχουν ξεχωριστούς κάθετους προωθητήρες).

Η πρόωση με εκτόξευση νερού (με δακτυλιοειδείς αξονικούς αναδευτήρες, ή με φυγοκεντρικές αντλίες, που κινούνται με κινητήρες diesel ή στροβίλους, χρησιμοποιείται σε ορισμένα γρήγορα και ταχέως ευκίνητα πλοία, που φτάνουν ταχύτητες > 20 m/s. Να παρατηρηθεί η μεγάλη διαφορά με τις ταχύτητες του αεροσκάφους (100-250 m/s). Ωστόσο, η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης είναι παρόμοια, λόγω της διαφοράς πυκνότητας ρευστού και στα δύο μέσα. Οι προπέλες είναι λιγότερο αποδοτικές από τις έλικες αέρα. Οι προπέλες του πλοίου μπορεί να έχουν  $\eta p = 0.5..0.7$  (έναντι  $\eta p = 0.8$  για έλικες αέρα), με τη μικρότερη τιμή για μεγάλα δεξαμενόπλοια (τα οποία έχουν αναλογίες πρόωσης  $J = 0.2 - 0.4$ ).

Ο ελιγμός επιτυγχάνεται εύκολα με τη χρήση του αζιμούθιου προωθητήρα, δηλαδή προπέλες που τοποθετούνται σε μια άτρακτο, που μπορεί να περιστραφεί σε οποιαδήποτε οριζόντια γωνία (αζιμούθιο), καθιστώντας το πηδάλιο περιττό. Οι περισσότεροι προωθητήρες αζιμούθιου (συχνά ονομάζονται αζιπόδια) είναι ηλεκτρικοί.

Η αναπόδιση του πλοίου συμβαίνει όταν ο μηχανισμός πρόωσης ενός πλοίου αναπτύσσει ώθηση προς μια οπισθοδρομική κατεύθυνση, είτε για επιβράδυνση και διακοπή, είτε για μετακίνηση προς τα πίσω. Ο συνηθισμένος τρόπος είναι με αντιστροφή βήματος σε προπέλα ρυθμιζόμενου βήματος, αλλά υπάρχουν και άλλοι τρόποι.

Το φορτηγό πλοίο με την δυνατότητα μεταφοράς αεροσκαφών και ελικοπτέρων Juan Carlos I, η μεγαλύτερη ναυτική μονάδα που κατασκευάστηκε ποτέ στην Ισπανία (εκτόπισμα 26.000 τόνων, μήκους 231 m) τροφοδοτείται από δύο γεννήτριες diesel και μία γεννήτρια αεριοστροβίλου, οδηγώντας δύο άτρακτους των 11 MW η καθεμία. Οι φρεγάτες F-100 (5800 τόνων, 147 m) έχουν δύο γεννήτριες diesel των 4.5 MW η καθεμία για κανονική πλοήγηση στα 9 m/s, συν δύο αεριοστροβίλους (GE LM - 2500) με ισχύ 25 MW η κάθε μία για να προωθούν στα 15 m/s, τροφοδοτώντας δύο προπέλες.



**Εικόνα 2.5** α) Αεροπλανοφόρο Juan Carlos I β) Φρεγάτα F-100. [41] [42]

Τα υδροπτέρυγα είναι σκάφη εφοδιασμένα με υποβρύχια φτερά (πτέρυγες κάτω από τη γάστρα, παρόμοιες με τις αεροτομές) που μπορούν να υποστηρίξουν το βάρος του σκάφους σε υψηλή ταχύτητα (να σημειωθεί ότι η άνοση του φτερού είναι σχεδόν ανάλογη με την ταχύτητα στο τετράγωνο). Η γάστρα ανυψώνεται πάνω και έξω από το νερό, με μεγάλη μείωση της οπισθέλκουσας και της κατανάλωσης καυσίμου. Δυστυχώς, η σύγκρουση των αιχμηρών επιφανειών του υδροπτέρυγου, με μεγάλα θαλάσσια ζώα ή πλωτά αντικείμενα, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά.



**Εικόνα 2.6** Υδροπτέρυγο σκάφος. [43]

Το 2012 το PlanetSolar έγινε το πρώτο ηλιακό ηλεκτρικό σκάφος που έκανε τον γύρο του κόσμου. Η ηλεκτρική πρόωση αναφέρεται συνήθως στο συνδυασμό μιας μηχανής εσωτερικής καύσης (ICE: diesel ή αεριοστροβίλου) και ηλεκτρικών κινητήρων που τροφοδοτούν απευθείας τον προωθητήρα (προπέλα ή αντλία εκτόξευσης νερού), είτε μέσω μηχανικής μετάδοσης (με συμπλέκτη και γρανάζια), είτε με ηλεκτρική γεννήτρια συζευγμένη με την μηχανή ICE και ηλεκτρική μετάδοση.



**Εικόνα 2.7** PlanetSolar. [44]

Από το 2015, περίπου το 90% του διεθνούς παγκόσμιου εμπορίου βασίζεται στη ναυτιλία, μεταφέροντας μεγάλες ποσότητες εμπορευμάτων κάθε χρόνο, αντιπροσωπεύοντας το 3.3% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub>, το 15% των παγκόσμιων εκπομπών NO<sub>x</sub> και το 13% των παγκόσμιων εκπομπών SO<sub>x</sub>. Οι ναυτιλιακές εταιρείες οφείλουν να συμμορφώνονται με τους κανόνες εκπομπής του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (international maritime organization – IMO) και της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από πλοία (MARPOL). Ο IMO έχει δηλώσει ορισμένες περιοχές ελέγχου εκπομπών (emission control areas - ECA) με αυστηρούς κανονισμούς (ιδίως για τα οξειδία του θείου) και από το 2016, τα πλοία πρέπει να διαθέτουν προωστικά μηχανήματα Κατηγορίας III.

Η περιβαλλοντική επιβάρυνση μπορεί να οφείλεται στο φορτίο που μεταφέρεται (π.χ. διαρροές ορυκτελαίων), στο σύστημα πρόωσης (π.χ. καυσαέρια, υδάτινα απόβλητα πλοίου που συγκεντρώνονται στην σεντίνα, καθαρισμός δεξαμενής καυσίμου) ή σε άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες επί του σκάφους.

Κατά την καύση HFO (heavy fuel oil), τα οξειδία του θείου εξουδετερώνονται σε πλυντρίδες, οι οποίες είναι κάθετα δοχεία πίεσης (που βρίσκονται στη χοάνη) όπου ψεκάζεται αλκαλικό νερό στα εξερχόμενα καυσαέρια μέσω διάτρητων πλακών. Οι πλυντρίδες γλυκού νερού (με προσθήκη NaOH) είναι πιο αποδοτικές και δαπανηρές από τις πλυντρίδες θαλασσινού νερού (η αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού έγκειται στα άλατα ασβεστίου). Οι πλυντρίδες απαλλάσσουν επίσης τις σωματιδιακές εκπομπές. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> μπορούν να μειωθούν με ανακυκλοφορία καυσαερίων.

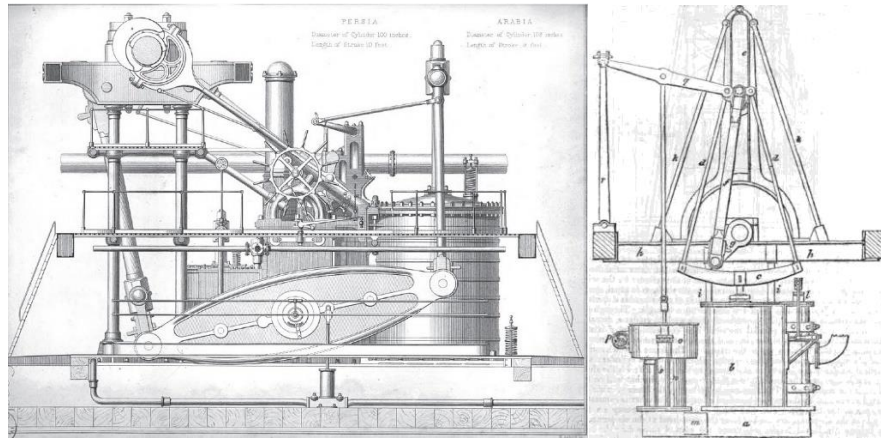
Άλλη θαλάσσια ρύπανση, αν και δεν σχετίζεται με την πρόωση, μπορεί να είναι τα λύματα και τα απορρίμματα. Τα ακατέργαστα λύματα δεν μπορούν να απορριφθούν εντός 20 χλμ. από την ακτή και οι εγκεκριμένες εγκαταστάσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται εγγύτερα. Οι εκροές νερού έρματος από πλοία μπορούν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον. Κανένα πλαστικό δεν πρέπει να απορρίπτεται στη θάλασσα. [14]

#### **2.4.1. Ατμοκινητήρες**

Οι πρώτοι κινητήρες, που λειτουργούσαν σε πλοία, ήταν ατμομηχανές. Η μηχανή ατμού είναι μια μηχανή θερμότητας, η οποία χρησιμοποιεί την ενέργεια και την πίεση του ατμού προκειμένου να παραγάγει έργο. Οι ατμομηχανές είναι συνήθως κινητήρες εξωτερικής καύσης.

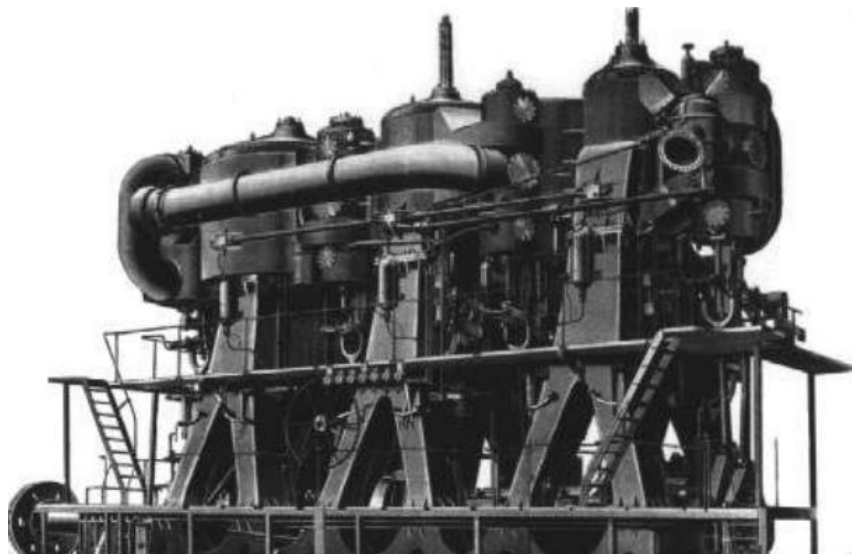
Πιο αναλυτικά, μια μεγάλη ποικιλία παλινδρομικών ατμομηχανών για ναυτική χρήση αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα με δύο βασικές μεθόδους ταξινόμησης τέτοιων κινητήρων που πραγματοποιούνται μέσω του μηχανισμού σύνδεσης και της τεχνολογίας κυλίνδρων. Οι περισσότεροι πρώιμοι ναυτικοί κινητήρες είχαν την ίδια τεχνολογία κυλίνδρων αλλά χρησιμοποιήθηκαν ανά καιρούς διάφορες μέθοδοι παροχής ισχύος στην στροφαλοφόρο άτρακτο – δηλαδή τον μηχανισμό σύνδεσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι ατμοκινητήρες ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον μηχανισμό σύνδεσης τους. Μερικοί συνηθισμένοι μηχανισμοί σύνδεσης ήταν ο πλευρικός μοχλός (side-lever), το καμπαναριό (steerple) που χαρακτηρίζεται έτσι λόγω του μεγάλου του ύψους, ο δοκός πορείας (walking-beam) και η άμεση δράση (direct acting). Ωστόσο, οι ατμομηχανές μπορούν επίσης να ταξινομηθούν σύμφωνα με την τεχνολογία των κυλίνδρων τους όπως απλή εκτόνωσης (simple expansion), σύνθετη (με την δυνατότητα διαφορετικής πίεσης σε κάθε κύλινδρο), δακτυλιοειδή.



**Εικόνα 2.8** α) πλευρικός μοχλός σύνδεσης β) σύνδεση τύπου “καμπαναριό” [45]

Συνεπώς, υπάρχει η δυνατότητα να βρεθούν παραδείγματα κινητήρων που ταξινομήθηκαν και στις δύο κατηγορίες. Με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι περισσότεροι κινητήρες έγιναν άμεσης δράσης, αλλά και οι τεχνολογίες κυλίνδρων γίνονταν πιο περίπλοκες, οι κινητήρες άρχισαν να ταξινομούνται αποκλειστικά σύμφωνα με την τεχνολογία κυλίνδρων τους.



**Εικόνα 2.9** Μια παλινδρομική ατμομηχανή . [32]

#### 2.4.2. Κινητήρες Diesel

Τα περισσότερα σύγχρονα πλοία χρησιμοποιούν τον παλινδρομικό κινητήρα diesel ως τον βασικό τους κινητήρα, λόγω της απλής λειτουργίας, της στιβαρότητας και της οικονομίας καυσίμου σε σύγκριση με τους περισσότερους άλλους κινητήρες. Ο στροφαλοφόρος άτρακτος μπορεί να συνδεθεί απευθείας με την προπέλα, ενώ στην περίπτωση αργόστροφων κινητήρων διά μέσου του μειωτήρα, και μέσου του κιβωτίου ταχυτήτων για βραδύστροφους και ταχύστροφους κινητήρες, ή μέσω ηλεκτρικού κινητήρα.

Επισημαίνεται ότι ο παλινδρομικός πετρελαιοκινητήρας τέθηκε για πρώτη φορά σε χρήση το έτος 1903 όταν το diesel-ηλεκτρικό δεξαμενόπλοιο Vandal τέθηκε σε λειτουργία από την Branobel. Οι κινητήρες diesel σύντομα προσέφεραν μεγαλύτερη απόδοση από ότι απέδιδε ο ατμοστρόβιλος, αλλά για πολλά χρόνια είχε χαμηλότερη αναλογία ισχύος προς βάρος (power to weight ratio). Ωστόσο, η



έλευση του αεροσυμπιεστή ο οποίος κινείται από μια τουρμπίνα (turbocharge) επιτάχυνε την υιοθέτησή τους, επιτρέποντας μεγαλύτερες τιμές ισχύος.

Οι κινητήρες diesel σήμερα ταξινομούνται ευρέως σύμφωνα με τον κύκλο λειτουργίας τους που αλλάζει εάν πρόκειται για δίχρονο ή για τετράχρονο κινητήρα. Συνεπώς:

❖ **Δίχρονος κινητήρας:** Ένας δίχρονος κινητήρας είναι ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης, ο οποίος ολοκληρώνει μια πλήρη καύση σε μία περιστροφή του στροφαλοφόρου ατράκτου.

❖ **Τετράχρονος κινητήρας:** Ένας τετράχρονος κινητήρας είναι ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης στον οποίο το έμβολο ολοκληρώνει τέσσερις ξεχωριστές διαδρομές –οι οποίες είναι η εισαγωγή, η συμπίεση, η ανάφλεξη (εκτόνωση) και η εξαγωγή κατά τη διάρκεια δύο ξεχωριστών στροφών του στροφαλοφόρου ατράκτου του κινητήρα, και έναν μόνο θερμοδυναμικό κύκλο. Οι τέσσερις χρόνοι αναφέρονται σε κύκλους εισαγωγής, συμπίεσης, καύσης (ισχύος) και εξαγωγής, οι οποίοι τελούνται κατά τη διάρκεια δύο περιστροφών της στροφαλοφόρου ατράκτου ανά κύκλο ισχύος των κινητήρων τεσσάρων χρόνων. Ο κύκλος ξεκινά από το άνω νεκρό σημείο, όταν το έμβολο βρίσκεται πιο μακριά από τον άξονα της στροφαλοφόρου ατράκτου. Ένας χρόνος αναφέρεται στην πλήρη διαδρομή του εμβόλου από το άνω νεκρό σημείο (top dead center) στο κάτω νεκρό σημείο (bottom dead center) και αντίστροφα.

❖ **Διαδρομή εισαγωγής:** κατά τη διαδρομή εισαγωγής, το έμβολο κατεβαίνει από την κορυφή του κυλίνδρου στο κάτω μέρος του κυλίνδρου, μειώνοντας την πίεση μέσα στον κύλινδρο. Ένα μείγμα καυσίμου και αέρα, ή απλώς αέρα σε έναν κινητήρα diesel, ωθείται από ατμοσφαιρική - ή έστω μεγαλύτερη- πίεση στον κύλινδρο μέσω της θύρας εισαγωγής και εν συνεχεία οι βαλβίδες εισαγωγής κλείνουν.

❖ **Διαδρομή συμπίεσης:** με τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής κλειστές, το έμβολο επιστρέφει στην κορυφή του κυλίνδρου συμπιέζοντας τον αέρα ή το μίγμα καυσίμου-αέρα στον θάλαμο καύσης της κυλινδροκεφαλής.

❖ **Διαδρομή εκτόνωσης (καύση):** αυτή είναι η αρχή της δεύτερης περιστροφής του κινητήρα. Ενώ το έμβολο βρίσκεται κοντά στο άνω νεκρό σημείο, το μείγμα πεπιεσμένου αέρα-καυσίμου σε έναν βενζινοκινητήρα ανάβει -συνήθως από ένα μπουζί- ή εισάγεται καύσιμο στον κινητήρα diesel, ο οποίος αναφλέγεται λόγω της θερμότητας του αέρα κατά τη διάρκεια του σταδίου συμπίεσης. Κατ' επέκταση, η προκύπτουσα μαζική πίεση από την καύση του μίγματος συμπιεσμένου καυσίμου-αέρα αναγκάζει το έμβολο να επιστρέψει προς τα κάτω, προς το νεκρό σημείο.

❖ **Διαδρομή καυσαερίων:** κατά τη διάρκεια της διαδρομής εξαγωγής, το έμβολο επιστρέφει και πάλι στο άνω νεκρό σημείο, ενώ η βαλβίδα εξαγωγής είναι ανοιχτή. Αυτή η ενέργεια εκκενώνει τα προϊόντα καύσης από τον κύλινδρο, αποβάλλοντας το μείγμα καυσαερίων μέσω της βαλβίδας εξαγωγής.

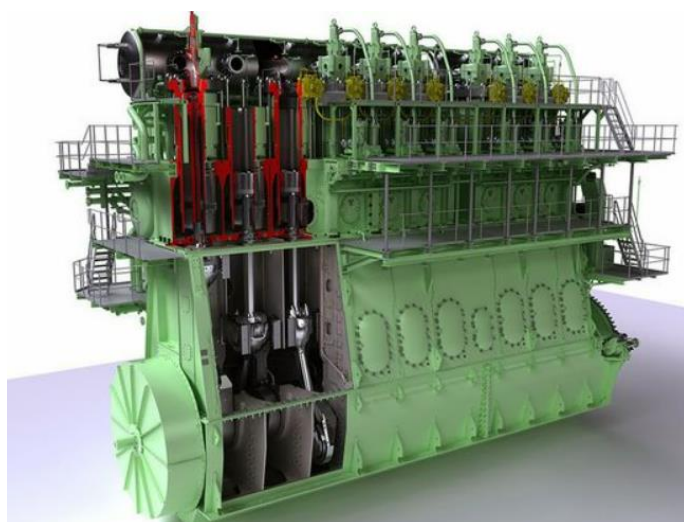
Αρχικά αναφέρονται ως αργόστροφοι κινητήρες, και νοείται ένας οποιοσδήποτε κινητήρας με μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας έως 300 στροφές ανά λεπτό (rpm), αν και οι περισσότεροι μεγάλοι δίχρονοι αργόστροφοι κινητήρες diesel λειτουργούν κάτω από 120 rpm. Ορισμένοι κινητήρες μεγάλης διάρκειας λειτουργίας έχουν μέγιστη ταχύτητα περίπου 80 rpm, ενώ οι μεγαλύτεροι και πιο ισχυροί κινητήρες στον κόσμο είναι δίχρονοι και crosshead diesel (ο διωστήρας και το έμβολο συνδέονται με μια εγκάρσια κεφαλή).

Η έννοια των βραδύστροφων κινητήρων σχετίζεται με οποιοδήποτε κινητήρα που αποδίδει μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας στην περιοχή των 300-900 rpm. Πολλοί σύγχρονοι τετράχρονοι βραδύστροφοι κινητήρες diesel αποδίδουν μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας, που φτάνει περίπου 500 rpm. Η υψηλή ταχύτητα αφορά οποιοδήποτε κινητήρα αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας πάνω από 900 rpm.

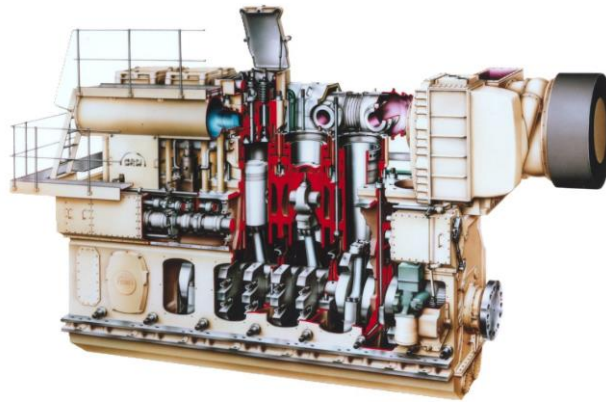
Τα περισσότερα μεγαλύτερα σύγχρονα εμπορικά πλοία χρησιμοποιούν δίχρονους αργόστροφους κινητήρες ή τετράχρονους βραδύστροφους κινητήρες. Ορισμένα μικρότερα πλοία ενδέχεται να χρησιμοποιούν ταχύστροφους κινητήρες. Το μέγεθος των διαφόρων τύπων κινητήρων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην επιλογή εγκατάστασης σε ένα νέο πλοίο. Πιο συγκεκριμένα, οι δίχρονοι κινητήρες χαμηλών στροφών είναι πολύ ψηλότεροι, αλλά ο απαιτούμενος χώρος είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για τους ισοδύναμους τετράχρονους βραδύστροφους κινητήρες diesel. Καθώς ο χώρος πάνω από την ίσαλο γραμμή είναι υψηλότερος σε επιβατηγά πλοία και ειδικά αυτά με κατάστρωμα υποδοχής αυτοκινήτου, αυτά τα πλοία τείνουν να χρησιμοποιούν πολλαπλούς κινητήρες μεσαίων στροφών με αποτέλεσμα μεγαλύτερο, χαμηλότερο μηχανοστάσιο από αυτό που απαιτείται για τους δίχρονους κινητήρες diesel.

Η εγκατάσταση πολλών κινητήρων παρέχει πλεονέκτημα σε περίπτωση μηχανικής βλάβης ενός ή περισσότερων κινητήρων, και την δυνατότητα για μεγαλύτερη απόδοση σε ένα ευρύτερο φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Καθώς οι προπέλες των σύγχρονων πλοίων κρίνονται ως πιο αποτελεσματικοί με την ταχύτητα λειτουργίας των αργόστροφων κινητήρων diesel, τα πλοία με αυτούς τους κινητήρες δεν χρειάζονται μειωτήρες στροφών σε ένα γενικότερο πλαίσιο. Συνήθως τέτοια πρωστικά συστήματα αποτελούνται από έναν ή δύο ατράκτους με τον δικό τους –σε κάθε περίπτωση- άμεσα συνδεδεμένο κινητήρα.

Επιπλέον, τα πλοία που κινούνται με κινητήρες diesel μεσαίων ή υψηλών στροφών μπορεί να έχουν μία ή δύο –και μερικές φορές ακόμη περισσότερες- προπέλες συνήθως με έναν ή περισσότερους κινητήρες που οδηγούν κάθε άτρακτο μέσω του μειωτήρα στροφών. Σε αυτήν την περίπτωση, περισσότεροι από ένας κινητήρες συνδέονται σε μια άτρακτο, ενώ παράλληλα κάθε κινητήρας πιθανότατα να καθοδηγείται μέσω συμπλέκτη, επιτρέποντας στους κινητήρες, που δεν χρησιμοποιούνται, να αποσυνδέονται από τον μειωτήρα στροφών ενώ άλλοι συνεχίζουν να λειτουργούν. Αυτή η διάταξη επιτρέπει τη συντήρηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, ακόμη και μακριά από το λιμάνι.



**Εικόνα 2.10** Δίχρονος κινητήρας Diesel. [2]



**Εικόνα 2.11** Ένας τετράχρονος πετρελαιοκινητήρας. [33]

### 2.4.3. Ατμοστρόβιλοι

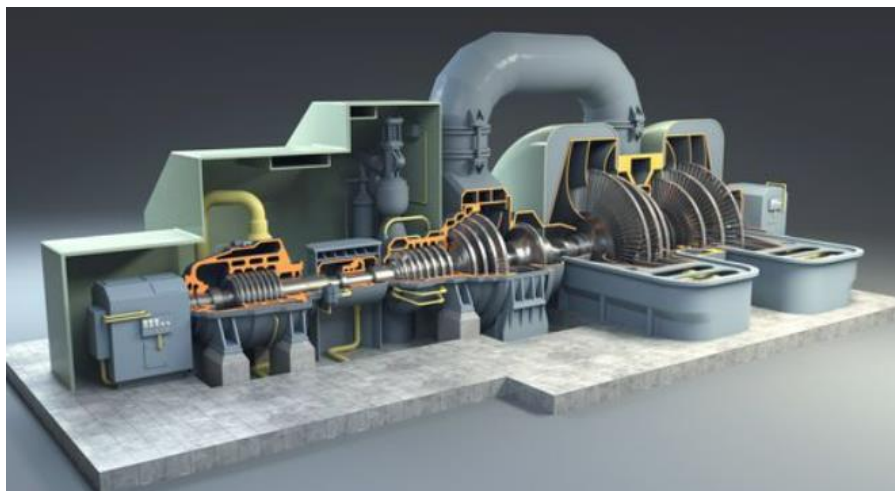
Ο ατμοστρόβιλος είναι μια κινητήρια θερμική μηχανή η οποία χρησιμοποιεί την ενέργεια του ατμού για την παραγωγή έργου. Ο αρχικός κινητήρας ατμού, που τροφοδότησε σε μεγάλο βαθμό τη βιομηχανική επανάσταση στη Μεγάλη Βρετανία, βασίστηκε σε παλινδρομικά έμβολα. Αυτό πλέον έχει αντικατασταθεί σχεδόν εντελώς από τον ατμοστρόβιλο, επειδή ο ατμοστρόβιλος έχει υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση και χαμηλότερη αναλογία ισχύος προς βάρος και είναι, ταυτόχρονα, ιδανικός για τις πολύ μεγάλες διαμορφώσεις ισχύος που χρησιμοποιούνται σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

Επιπλέον, οι ατμοστρόβιλοι κατασκευάζονται σε ποικίλα μεγέθη, που κυμαίνονται από μικρές μονάδες 0.75 kW, και χρησιμοποιούνται για αντλίες, συμπιεστές και άλλο εξοπλισμό με άξονα, έως 1.500.000kW και για στρόβιλους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ατμοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε ναυτικές εφαρμογές σχετικά με τα συστήματα προώθησης σκαφών.

Τον τελευταίο καιρό οι ατμοστρόβιλοι αναπτύχθηκαν για αεροδιαστημικές εφαρμογές όπου και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που κυριαρχείται από ατμοστρόβιλους. Η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε μηχανική εργασία μέσω εκτόνωσης του, και διά μέσου του στρόβιλου.

Ένας ατμοστρόβιλος αποτελείται από έναν άξονα, και ένα τύμπανο τοποθετημένο σε αυτόν, το οποίο είναι εφοδιασμένο με πτερύγια, με δυνατότητα κίνησης αλλά και από πτερύγια όπου είναι σταθερά.

Τα κινούμενα πτερύγια περιστρέφονται στον κεντρικό ρότορα τουρμπίνας και τα σταθερά πτερύγια διατάσσονται ομόκεντρα εντός του κυκλικού περιβλήματος στρόβιλου, το οποίο είναι ουσιαστικά σχεδιασμένο να αντέχει στην πίεση ατμού.



**Εικόνα 2.12** Ένας ατμοστρόβιλος. [34]

#### 2.4.4. Αεριοστρόβιλοι

Ένας αεριοστρόβιλος, που ονομάζεται, επίσης, στρόβιλος καύσης, είναι ένας περιστροφικός κινητήρας που παράγει ενέργεια από μια ροή αερίου καύσης και την μετατρέπει σε ωφέλιμο έργο. Τα κύρια τμήματα που απαρτίζουν έναν αεριοστρόβιλο είναι ο συμπιεστής ο οποίος συνδέεται με έναν στρόβιλο, και έναν θάλαμο καύσης στο ενδιάμεσο. Η ενέργεια προστίθεται στην ροή του αέρα εντός του καυστήρα, όπου ο αέρας αναμιγνύεται με καύσιμο και αναφλέγεται. Ο λόγος ισχύος προς το βάρος είναι πολύ μεγάλος στους αεριοστρόβιλους.

Η καύση αυξάνει τη θερμοκρασία, την ταχύτητα και τον όγκο της ροής αερίου και κατευθύνεται μέσω ενός ακροφυσίου πάνω στα πτερύγια του στρόβιλου, περιστρέφοντας τον στρόβιλο και τροφοδοτώντας τον συμπιεστή. Η ενέργεια εξάγεται με τη μορφή ισχύος άξονα, πεπιεσμένου αέρα και ώσης, σε οποιονδήποτε συνδυασμό και χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία αεροσκαφών, τρένων, πλοίων, γεννητριών, ακόμη και δεξαμενών.

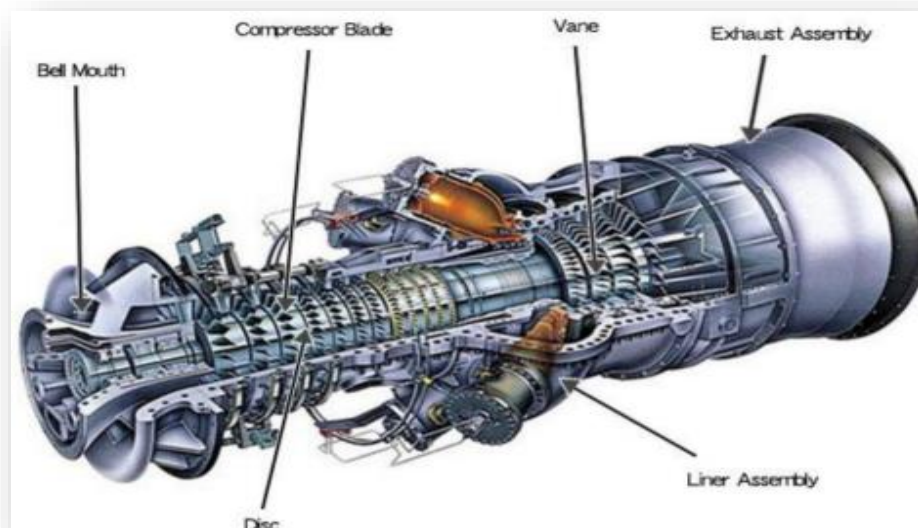
Οι αεριοστρόβιλοι περιγράφονται θερμοδυναμικά από τον κύκλο Brayton, στον οποίο ο αέρας συμπιέζεται ισεντροπικά, η καύση λαμβάνει χώρα σε σταθερή πίεση και η εκτόνωση μέσα στην τουρμπίνα γίνεται ισεντροπικά μέχρι πίσω στην αρχική πίεση. Ωστόσο, ο πραγματικός κύκλος Brayton εκτελεί μη ισεντροπική συμπίεση και εκτόνωση καθώς οι παραπάνω διεργασίες είναι μη αδιαβατικές και μη αντιστρεπτές, το περίβλημα του αεριοστρόβιλου δεν είναι αδιαβατικό και υπάρχουν απώλειες τριβής. Επίσης τα φαινόμενα τριβής οδηγούν σε απώλειες πίεσης στον θάλαμο καύσης καθώς και στους αγωγούς εισόδου – εξόδου. Όπως συμβαίνει με όλους τους κινητήρες που λειτουργούν με θερμικούς κύκλους, η υψηλότερη θερμοκρασία καύσης συνεπάγεται μεγαλύτερη απόδοση. Ο περιοριστικός παράγοντας είναι η ικανότητα του χάλυβα, του νικελίου, των κεραμικών ή άλλων υλικών που συνθέτουν τον κινητήρα να αντέχει τη θερμότητα και την πίεση.

Για την αύξηση βαθμού απόδοσης γίνεται η χρήση εναλλακτών αντιρροής, οι οποίοι μεταφέρουν την θερμότητα καυσαερίων στον αέρα εισαγωγής του συμπιεστή, πριν από την καύση. Μηχανικά οι αεριοστρόβιλοι μπορεί να είναι λιγότερο περίπλοκοι από τους κινητήρες εμβόλων εσωτερικής καύσης. Οι απλοί στρόβιλοι μπορεί να έχουν ένα κινούμενο μέρος, το οποίο περιλαμβάνει το συγκρότημα συνδεσμολογία στροφέα/ άξονα/συμπιεστή / στρόβιλου χωρίς να υπολογίζεται το σύστημα καυσίμου.

Παρόλα αυτά, η απαιτούμενη ακρίβεια για την κατασκευή εξαρτημάτων που θα είναι ανθεκτικά στη θερμοκρασία κραμάτων τα οποία απαιτούνται για υψηλή απόδοση, συχνά κάνει την κατασκευή ενός απλού στρόβιλου πιο περίπλοκη από τους κινητήρες εμβόλων. Αναφέρεται πως οι πιο εξελιγμένοι

στροβίλοι -όπως αυτοί που βρίσκονται στους σύγχρονους κινητήρες τζετ- υπάρχει η πιθανότητα να έχουν πολλαπλούς άξονες, εκατοντάδες πτερύγια στροβίλου, βαθμίδες σταθερών και μη πτερυγίων και ένα τεράστιο σύστημα πολύπλοκων σωληνώσεων, καυστήρων και εναλλάκτη θερμότητας. Κατά κανόνα, όσο μικρότερος είναι ο κινητήρας, τόσο υψηλότερος πρέπει να είναι ο ρυθμός περιστροφής του άξονα ή των αξόνων για τη διατήρηση της τελικής ταχύτητας. Η τελική ταχύτητα του στροβίλου καθορίζει τη μέγιστη πίεση που μπορεί να επιτευχθεί. Αυτό παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ ανεξάρτητα από το μέγεθος του κινητήρα. Οι αεριοθούμενοι κινητήρες λειτουργούν περίπου σε 10.000 rpm και οι μικρές τουρμπίνες περίπου σε 100.000 rpm.

Τέλος, τα έδρανα ώθησης και τα έδρανα περιοδικών αποτελούν κρίσιμο μέρος του σχεδιασμού. Παραδοσιακά, ήταν υδροδυναμικά έδρανα λαδιού, ή έδρανα με ψύξη λαδιού.



**Εικόνα 2.13** Ένας αεριοστροβίλος. [35]

#### 2.4.5. Στροβίλος πυρηνικής ενέργειας

Ένα πλοίο με πυρηνική ενέργεια κατασκευάζεται μαζί με τον πυρηνικό σταθμό ο οποίος βρίσκεται σε ένα τμήμα του πλοίου και περιλαμβάνει τον αντιδραστήρα. Τα εξαρτήματα του πυρηνικού σταθμού περιλαμβάνουν ένα δοχείο αντιδραστήρα με χάλυβα υψηλής αντοχής, εναλλάκτες θερμότητας -όπως η γεννήτρια ατμού- και συναφείς σωληνώσεις, αντλίες και βαλβίδες. Επεξηγηματικά, κάθε μονάδα αντιδραστήρα περιέχει πάνω από 100 τόνους θωράκισης μόλυβδου, μέρος των οποίων γίνεται ραδιενεργό μέσω της επαφής με ραδιενεργό υλικό ή με ενεργοποίηση νετρονίων ακαθαρσιών που βρίσκονται στον μόλυβδο.

Στη συνέχεια, η μονάδα προώθησης ενός πυρηνικού πλοίου ή υποβρυχίου χρησιμοποιεί έναν πυρηνικό αντιδραστήρα για την παραγωγή θερμότητας. Η θερμότητα προέρχεται από τη σύντηξη πυρηνικών καυσίμων, που περιέχονται στον αντιδραστήρα. Δεδομένου ότι η διαδικασία σύντηξης παράγει επίσης ακτινοβολία, τοποθετούνται προστατευτικά γύρω από τον αντιδραστήρα, έτσι ώστε το πλήρωμα να προστατεύεται. Η μονάδα πυρηνικής πρόωσης χρησιμοποιεί έναν σχεδιασμένο αντιδραστήρα υπό πίεση, ο οποίος περιλαμβάνει δύο βασικά συστήματα που το ένα είναι το πρωτεύον σύστημα και το άλλο είναι ένα δευτερεύον σύστημα. Το πρωτεύον σύστημα χρησιμοποιεί νερό και αποτελείται από τον αντιδραστήρα, τους βρόχους σωληνώσεων, τις αντλίες και τις

ατμογεννήτριες. Η θερμότητα που παράγεται στον αντιδραστήρα μεταφέρεται στο νερό υπό υψηλή πίεση, ώστε να μην βράσει. Αυτό το νερό αντλείται μέσω των ατμογεννητριών και επιστρέφει στον αντιδραστήρα για επαναθέρμανση.

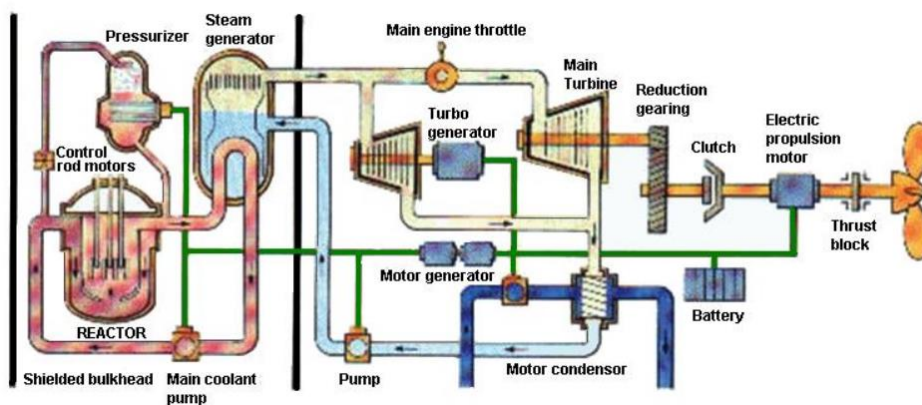
Στις γεννήτριες ατμού, η θερμότητα από το νερό στο πρωτογενές σύστημα μεταφέρεται στο δευτερεύον σύστημα για τη δημιουργία ατμού. Εν συνεχεία, το δευτερεύον σύστημα απομονώνεται από το πρωτογενές σύστημα με στόχο τη μη ανάμειξη του νερού στα δύο συστήματα.

Στο δευτερεύον σύστημα, ο ατμός ρέει από τις γεννήτριες ατμού για την κίνηση των γεννητριών της τουρμπίνας, οι οποίες τροφοδοτούν το πλοίο με ηλεκτρική ενέργεια, και στους κύριους στρόβιλους πρόωσης, οι οποίοι οδηγούν την προπέλα. Αφού περάσει από τις τουρμπίνες, ο ατμός συμπυκνώνεται σε νερό και τροφοδοτείται πίσω στις γεννήτριες ατμού από τις αντλίες τροφοδοσίας. Συνεπώς, τόσο το πρωτογενές όσο και το δευτερεύον σύστημα αποτελούν κλειστά συστήματα, όπου το νερό ανακυκλοφορεί και ανανεώνεται.

Επιπρόσθετα, οι ναυτικοί αντιδραστήρες σε πολεμικά πλοία υφίστανται επαναλαμβανόμενες αλλαγές ισχύος για ελιγμούς πλοίων, σε αντίθεση με τα μη πολεμικά πλοία που λειτουργούν σε σταθερή κατάσταση. Οι απαιτήσεις της πυρηνικής ασφάλειας, της ακτινοβολίας και της απόδοσης λειτουργίας, υπαγορεύουν εξαιρετικά υψηλά πρότυπα για την κατασκευή εξαρτημάτων και τη διασφάλιση ποιότητας.

Τα εσωτερικά μέρη ενός αντιδραστήρα ναυτικής χρήσης παραμένουν απρόσιτα για επιθεώρηση ή αντικατάσταση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό δεν ισχύει για έναν τυπικό εμπορικό πυρηνικό αντιδραστήρα, ο οποίος ανοίγει για ανεφοδιασμό περίπου κάθε δεκαοκτώ μήνες.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένα βήμα στην παραγωγή αυτής της δύναμης που απαιτεί την παρουσία αέρα ή οξυγόνου, αυτό επιτρέπει στο πλοίο να λειτουργεί εντελώς ανεξάρτητα από την ατμόσφαιρα για παρατεταμένες χρονικές περιόδους.



**Εικόνα 2.14** Ένα πυρηνικό σύστημα ατμοστρόβιλων. [36]

## 2.5. Αντιστοιχία μηχανών και πλοίων

Μπορούν να εξεταστούν δύο είδη αντιστοιχίσης:

- Αντιστοίχιση πρόωσης, δηλ. τι είδους και μεγέθους κινητήρων απαιτούνται για την παροχή της ισχύος πρόωσης για την αντιστάθμιση της οπισθέλκουσας του σκάφους κατά τον απόπλου, και της επιπρόσθετης ισχύος για επιτάχυνση και επιβράδυνση. Περαιτέρω ισχύς του κινητήρα πρέπει να ληφθεί υπόψη για ενέργειες που δεν αφορούν την πρόωση του πλοίου, που μπορεί να είναι έως και οι μισές σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια.
- Αντιστοίχιση τοποθεσίας και βοηθητική διασύνδεση, δηλαδή μηχανοστάσια, δεξαμενές καυσίμων, χοάνες κ.λπ.

Για την ελαχιστοποίηση του κόστους πρόωσης, τα πλοία πρέπει να είναι σχεδιασμένα ώστε να κινούνται με μειωμένη οπισθέλκουσα δύναμη που εφαρμόζεται σε αυτά κατά την κίνηση. Η αντίσταση του πλοίου ορίζεται ως η δύναμη που απαιτείται για τη ρυμούλκηση του πλοίου σε ήρεμα νερά με μία σταθερή ταχύτητα.

Εκτός από τα ιστιοφόρα πλοία, όπου οι πλευρικές δυνάμεις μπορεί να είναι σημαντικές, σε όλα τα άλλα πλοία είναι μόνο η διαμήκης δύναμη που πρέπει να ληφθεί υπόψη (αντίσταση πλοίου στην πρόοδο), ενώ η πλευρική συνιστώσα θεωρείται αμελητέα.

Γενικά, η δύναμη οπισθέλκουσας είναι η δύναμη η οποία έχει τον ίδιο φορέα με αυτόν της ταχύτητας, αλλά αντίθετη φορά και εμφανίζεται κατά την κίνηση ενός αντικειμένου σε ένα ρευστό, ωστόσο θεωρείται παγκοσμίως, ότι η οπισθέλκουσα μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικούς όρους:

- Παρασιτική οπισθέλκουσα (parasitic drag), η οποία παράγεται κατά την κίνηση ενός σώματος μέσα σε ένα ρευστό με ιξώδες, οφείλεται όχι μόνο στην αναπόφευκτη διάτμηση στην επιφάνεια του σώματος (skin friction), η οποία κυριαρχεί σε αεροδυναμικά σώματα όπως πλοία, αλλά επίσης στην μη ισορροπία πίεσης-δύναμης στις αποκολλημένες ροές (κυρίαρχη σε αμβλύα σώματα και αποκολλημένες ροές).

Η διάτμηση μπορεί να μειωθεί αποφεύγοντας ή καθυστερώντας την μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή στο προσκολλημένο οριακό στρώμα (boundary layer - BL). Η μη ισορροπία πίεσης-δύναμης μπορεί να αποφευχθεί ή να ελαχιστοποιηθεί κάνοντας το σώμα αεροδυναμικό και καθυστερώντας την αποκόλληση BL, εάν υπάρχει.

- Δυναμική οπισθέλκουσα, είναι η συνιστώσα της δύναμης που ασκείται στο σώμα από το ρευστό, σε διεύθυνση κάθετη στην κίνηση του σώματος, ουσιαστικά εξαιτίας των κυματισμών (κυματική οπισθέλκουσα) αλλά επίσης λόγω της κυματικής διάσπασης (wave breaking) και της ρίψης δίνης (eddy shedding).

Τα πλοία κινούνται στην πραγματικότητα ταυτόχρονα μέσω δύο ρευστών, νερού και αέρα, με πολύ διαφορετική πυκνότητα, το καθένα συμβάλλοντας σε μια αντίσταση κατά την κίνηση, η οποία σε μια πρώτη προσέγγιση είναι ανάλογη της πυκνότητας έτσι ώστε η αντίσταση στον αέρα να παραμελείται συχνά έναντι της αντίστασης στο νερό.

Ως εκ τούτου, εξετάζεται μόνο η επιφανειακή τριβή στο βυθισμένο τμήμα της γάστρας και η αντίσταση των κυμάτων, παραβλέποντας τις επιδράσεις των προσαρτημάτων (προπέλες, πηδάλια και τρόπιδες), της οπισθέλκουσας λόγω πίεσης και της οπισθέλκουσας λόγω αέρα (στην υπερκατασκευή και στο τμήμα πάνω από τη γάστρα).

Η αντίσταση του πλοίου σε κίνηση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα, το μέγεθος, τη βρεχόμενη επιφάνεια και άλλες γεωμετρικές παραμέτρους, με ένα τυπικό ποσοστό περίπου 60% παρασιτικής οπισθέλκουσας (30% επιφανειακή (skin) οπισθέλκουσα, 25% οπισθέλκουσα απορρεύματος και 5% οπισθέλκουσα αέρα), και 40% οπισθέλκουσας κυματισμού. Ωστόσο, η οπισθέλκουσα κυματισμού μπορεί να αυξηθεί σε 60% σε ταχύπλοα και ιστιοφόρα, και να είναι μικρότερη από το 20% σε πολύ μεγάλα πλοία. [16]

Οι πιο σημαντικές αδιάστατες παράμετροι στην αντίσταση οπισθέλκουσας είναι :

Ο αριθμός Reynolds ( $Re = V_0 L / \nu$ ), αριθμός Froude ( $Fr = V_0 / \sqrt{Lg}$ ) και ο συντελεστής οπισθέλκουσας ( $c_D$ ). Για παρόμοιες γεωμετρίες, μόνο για τον  $c_D = f(Re, Fr)$  ο Froude πρότεινε ότι  $c_{D,skin} = f(Re)$  και  $c_{D,wave} = f(Fr)$  ..



### 3. ΠΡΟΠΕΛΑ

Η προπέλα αποτελείται από τα πτερύγια τα οποία τοποθετούνται ομόκεντρα και ενιαία σε έναν άξονα και μεταδίδουν ενέργεια μετατρέποντας την περιστροφική κίνηση σε ώθηση. Δημιουργείται διαφορά πίεσης μεταξύ της εμπρόσθιας και της οπίσθιας επιφάνειας του πτερυγίου και το νερό επιταχύνεται πίσω από το πτερύγιο. Η προπέλα είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος πρόωσης στα πλοία, δίνοντας ορμή στο ρευστό που προκαλεί τη δύναμη δράσης στο πλοίο.

Τρία, τέσσερα ή πέντε πτερύγια είναι πιο συνηθισμένα στις προπέλες για ναυτική πρόωση, αν και σε περίπτωση λειτουργίας με μειωμένο θόρυβο έχουν περισσότερα πτερύγια. Τα πτερύγια είναι προσαρμοσμένα στην πλήμνη, η οποία θα πρέπει να είναι τόσο μικρή όσο οι ανάγκες αντοχής το επιτρέπουν.

Ένας εναλλακτικός σχεδιασμός είναι η προπέλα ελεγχόμενου βήματος (controllable pitch propeller - CPP, ή controllable-reversible pitch - CRP), όπου τα πτερύγια περιστρέφονται κανονικά στον άξονα κίνησης με πρόσθετα μηχανισμό στην πλήμνη και στους συνδέσμους ελέγχου που διατρέχουν τον άξονα.

Αυτό επιτρέπει την λειτουργία με σταθερή ταχύτητα ενώ η φόρτιση της προπέλας αλλάζει ώστε να ανταποκρίνεται στις συνθήκες λειτουργίας. Εξαλείφει επίσης την ανάγκη για μηχανισμό οπισθοπορείας και επιτρέπει ταχύτερη αλλαγή στην ώθηση, καθώς οι περιστροφές είναι συνεχείς.

Αυτός ο τύπος προπέλας είναι πιο συνηθισμένος σε πλοία, όπως ρυμουλκά, όπου μπορεί να υπάρχουν τεράστιες διαφορές στη φόρτωση προπέλας κατά τη ρυμούλκηση σε σύγκριση με την ελεύθερη κίνηση, μια αλλαγή που θα μπορούσε να προκαλέσει πρόβλημα σε συμβατικές προπέλες, καθώς δημιουργείται ανεπαρκής ροπή.

Τα μειονεκτήματα μιας CPP/CRP είναι: η μεγάλη πλήμνη που μειώνει τη ροπή που απαιτείται για την πρόκληση περιστροφών, η μηχανική πολυπλοκότητα που περιορίζει την ισχύ μετάδοσης και οι πρόσθετες απαιτήσεις διαμόρφωσης πτερυγίων που επιβάλλονται στον σχεδιαστή της προπέλας. [17]



**Εικόνα 3.1** Τυπική προπέλα μεγάλων πλοίων. [37]

### 3.1. Τύποι προπέλας

Οι προπέλες ταξινομούνται με βάση διάφορους παράγοντες. Η ταξινόμηση των διαφόρων τύπων μπορεί να γίνει βάσει του αριθμού των προσαρτημένων πτερυγίων του. Τα πτερύγια μπορεί να ποικίλλουν από 3 έως 4 και μερικές φορές ακόμα και 5. Ωστόσο, τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι αυτά με τα τρία και τέσσερα πτερύγια.

#### 3.1.1. Προπέλα τριών πτερυγίων



**Εικόνα 3.2** Προπέλα τριών πτερυγίων [17]

Μία προπέλα τριών πτερυγίων έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: το κόστος κατασκευής είναι χαμηλότερο από άλλους τύπους, συνήθως αποτελείται από κράμα αλουμινίου, παρέχει καλή απόδοση σε υψηλές ταχύτητες. Η επιτάχυνση που προσφέρει είναι καλύτερη από άλλους τύπους. Ωστόσο ο χειρισμός σε χαμηλή ταχύτητα δεν χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα αποτελεσματικός. [17]

#### 3.1.2. Προπέλα τεσσάρων πτερυγίων



**Εικόνα 3.3** Μια προπέλα τεσσάρων πτερυγίων. [17]

Μία προπέλα τεσσάρων πτερυγίων έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: το κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο από αυτόν της προπέλας τριών πτερυγίων, οι προπέλες τεσσάρων πτερυγίων αποτελούνται συνήθως από κράματα ανοξείδωτου χάλυβα, έχει μεγαλύτερη αντοχή και

ανθεκτικότητα, παρέχει καλό χειρισμό και απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες, έχει καλύτερη συμπεριφορά στον χειρισμό σε περίπτωση δύσκολων καιρικών συνθηκών. Τέλος μία προπέλα τεσσάρων πτερυγίων παρέχει καλύτερη οικονομία καυσίμου από όλους τους άλλους τύπους. [17]

### 3.1.3. Προπέλα πέντε πτερυγίων



**Εικόνα 3.4** Μια προπέλα πέντε πτερυγίων [17]

Μία προπέλα πέντε πτερυγίων έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: το κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο από τους άλλους τύπους, οι κραδασμοί λιγότεροι συγκριτικά με τους άλλους τύπους. Τέλος οι προπέλες πέντε πτερυγίων έχουν καλύτερη ισχύ σε περίπτωση δύσκολων καιρικών συνθηκών . [17]

## 3.2. Βήμα Προπέλας

Το βήμα μιας προπέλας μπορεί να οριστεί ως η απόσταση που διανύει η προπέλα σε μια πλήρη περιστροφή της και αποτελεί σημαντικό κριτήριο στην επιλογή της προπέλας για το σκάφος.

### 3.3.1. Προπέλα σταθερού βήματος

Τα πτερύγια της προπέλας σταθερού βήματος είναι μονίμως συνδεδεμένα την πλήμνη. Οι προπέλες τύπου σταθερού βήματος διατηρούν σταθερή τη θέση των πτερυγίων και επομένως η θέση του βήματος είναι μόνιμα σταθερή και δεν μπορεί να αλλάξει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.

Οι προπέλες σταθερού βήματος είναι ανθεκτικοί και αξιόπιστοι, καθώς το σύστημα δεν ενσωματώνει καμία μηχανική και υδραυλική σύνδεση όπως στην προπέλα ελεγχόμενου βήματος (CPP). Το κόστος κατασκευής, εγκατάστασης και λειτουργίας είναι χαμηλότερο από τον τύπο προπέλας ελεγχόμενου βήματος (controlled pitch propeller - CPP), ενώ η ικανότητα ελιγμών της προπέλας σταθερού βήματος δεν είναι εξίσου καλή με την CPP.

### 3.3.2. Προπέλα ελεγχόμενου βήματος

Σε προπέλα τύπου ελεγχόμενου βήματος, είναι δυνατή η αλλαγή της κλίσης περιστρέφοντας το πτερύγιο γύρω από τον κατακόρυφο άξονά της μέσω μηχανικής και υδραυλικής διάταξης. Αυτό βοηθά στον χειρισμό της προωστικής μηχανής σε σταθερό φορτίο χωρίς να απαιτείται μηχανισμός αναστροφής, καθώς η κλίση μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να αντιστοιχεί στην απαιτούμενη κατάσταση λειτουργίας. Έτσι βελτιώνεται η ικανότητα ελιγμών και αυξάνεται επίσης η απόδοση του κινητήρα.

Αυτό το πλεονέκτημα περιλαμβάνει την πιθανότητα πετρελαϊκής ρύπανσης, καθώς το πετρέλαιο που χρησιμοποιείται στην πλήμνη για τον έλεγχο της κλίσης μπορεί να διαρρεύσει. Πρόκειται για ένα πολύπλοκο και δαπανηρό σύστημα, τόσο από άποψη εγκατάστασης όσο και από άποψη λειτουργίας. [18]

### 3.3. Σπηλαιώση

Το φαινόμενο της σπηλαιώσης (cavitation) αναπτύσσεται όταν σε μια περιοχή η στατική πίεση τείνει τοπικά να γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του υγρού, οπότε αυτό ατμοποιείται και αναπτύσσεται ένας θύλακας ατμοποιημένου υγρού (ατμού).

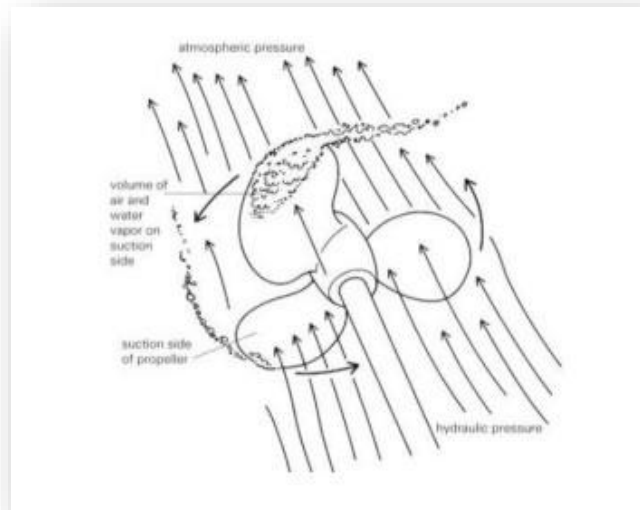
Κατά την χρήση της προπέλας για την παροχή δύναμης ώθησης σε ένα πλοίο, δημιουργείται το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Αυτό εξηγείται με τον νόμο του Bernoulli, όπου η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί πτώση πίεσης, επομένως σε περίπτωση μεγάλης αύξησης της ταχύτητας η πίεση μειώνεται σε τέτοιο επίπεδο ώστε το σημείο βρασμού να πέσει στην θερμοκρασία του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα πτερύγια της προπέλας να λειτουργούν σε ένα ρευστό μέσο με μικρότερη πυκνότητα που οδηγεί στην αύξηση της ολίσθησης και την μείωση της απόδοσης.

Όταν η πίεση σε ένα σημείο του πτερυγίου γίνει μικρότερη από την πίεση ατμοποίησης του νερού (λόγω την αυξημένης ταχύτητας ροής), δημιουργούνται φυσαλίδες αέρα και ατμού. Στην συνέχεια οι φυσαλίδες προχωρούν κατά μήκος του πτερυγίου και εισέρχονται σε πεδίο με υψηλότερη πίεση όπου συμπιέζονται και συμπυκνώνονται στιγμιαία με αποτέλεσμα να ασκούνται υψηλές δυνάμεις στην επιφάνεια του πτερυγίου. Παρατηρείται ότι όταν η ταχύτητα ροής λαμβάνει υψηλές τιμές τότε η πίεση φτάνει σε πολύ χαμηλές τιμές ακόμα και αρνητικές. Συγκεκριμένα σε ροές νερού με υψηλές ταχύτητες εμφανίζονται χαμηλές πιέσεις, στιγμιαία η πίεση μειώνεται σε επίπεδο όπου είναι μικρότερη από την πίεση των ατμών, και μετατρέπεται το νερό από την υγρή σε αέρια φάση δημιουργώντας μικρές φυσαλίδες. Στην συνέχεια οι φυσαλίδες αυτές μεταφερόμενες σε σημεία με μεγαλύτερη πίεση και μετατρέπονται στιγμιαία σε υγρή φάση απελευθερώνοντας κρουστικές δυνάμεις υψηλού μεγέθους προκαλώντας φθορά και η διάβρωση στο υλικό του πτερυγίου. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντική η επιλογή του είδους και το υλικό της προπέλας που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου να αντέξει τις τάσεις που αναπτύσσονται.

Η σπηλαιώση συνήθως διαιρείται σε δύο κατηγορίες συμπεριφοράς: αδρανειακή σπηλαιώση και μη αδρανειακή σπηλαιώση. Η αδρανειακή σπηλαιώση (inertial cavitation) κατά την οποία γίνεται απότομη υγροποίηση των φυσαλίδων όταν αυτές εισέλθουν σε περιοχή με υψηλότερη πίεση, προκαλώντας φθορά στα πτερύγια.

Μη αδρανειακή σπηλαιώση (non-inertial cavitation) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο οι φυσαλίδες παραμένουν σε αέρια κατάσταση και εξαναγκάζονται να ταλαντεύονται λόγω κάποιας μορφής εισροής ενέργειας, όπως ένα ακουστικό πεδίο. Το εν λόγω φαινόμενο χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα καθαρισμού με υπερήχους και μπορεί επίσης να παρατηρηθεί σε αντλίες και προπέλες.

Δεδομένου ότι τα κύματα των κραδασμών που σχηματίζονται είναι αρκετά ισχυρά ώστε να προκαλούν σημαντική βλάβη στα κινούμενα μέρη, το φαινόμενο αυτό είναι συνήθως ανεπιθύμητο. [18]



**Εικόνα 3.5** Απεικόνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης [18]

## 4. ΚΥΡΙΕΣ ΑΡΧΕΣ & ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ/ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το μηχανοστάσιο των εμπορικών πλοίων τοποθετείται στο πίσω μέρος του πλοίου, έτσι ώστε ο διαθέσιμος χώρος να μπορεί να μεγιστοποιηθεί για τη μεταφορά των φορτίων και την ελαχιστοποίηση του μήκους της ατράκτου που δίνει κίνηση στην προπέλα, ώστε το μηχανοστάσιο να βρίσκεται κοντά στο κατάστρωμα.

Η συμμετρική κατανομή του βάρους των πλοίων και η τοποθέτηση των δεξαμενών στο μηχανοστάσιο είναι απαραίτητες ενέργειες, ώστε να μην μπορούν να επηρεάσουν τη ευστάθειά τους. Για το λόγο αυτό τα βαριά εξαρτήματα τοποθετούνται στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο.

Οι υδραντλίες πρέπει να τοποθετούνται κάτω από τη γραμμή ισάλου του σκάφους. Παρόμοια μηχανήματα του εξοπλισμού πρέπει να τοποθετούνται σε σχετική κοντινή απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε η λειτουργία τους να είναι εύκολη. Οι υδραυλικές εγκαταστάσεις δεν πρέπει να διέρχονται από δεξαμενές, διότι η επιθεώρηση και η συντήρησή τους πρέπει να είναι εύκολη. Οι αεροδεξαμενές του συστήματος αέρα εκκίνησης τοποθετούνται σε σχετική κλίση, ώστε η αποστράγγισή τους να γίνεται εύκολα.

### 4.1. Συζευκτές

Οι συζευκτές συνήθως τοποθετούνται μεταξύ κινητήρα και ατράκτου. Η χρήση τους λειτουργεί ως «αποσβεστήρας» (dumper), έτσι ώστε να ομαλοποιήσει τις απότομες αλλαγές της ροπής των κινητήρων και να προστατεύσει τους μειωτήρες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γρήγορος συμπλέκτης σύνδεσης-αποσύνδεσης κατά τη διαδικασία ελιγμών και λειτουργεί ως σύστημα ασφάλειας για τη μέγιστη ροπή που μεταφέρεται. [19]

Οι διάφορες κατηγορίες των συζευκτών που χρησιμοποιούνται είναι:

- ηλεκτρομαγνητικός
- υδραυλικός
- μηχανικός

### 4.2. Μηχανισμοί μείωσης

Οι μειωτήρες χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα του κινητήρα σε ταχύτητα κατάλληλη για τη μέγιστη απόδοση της προπέλας του πλοίου. Χρησιμοποιούνται ζευγάρια "οδοντωτών" τροχών, με διαφορετικό αριθμό δοντιών και διαφορετική διάμετρο για κάθε κιβώτιο ταχυτήτων. Η μείωση των περιστροφών συνοδεύεται από την αύξηση της ροπής, έτσι η μεταφερόμενη ισχύς μπορεί να είναι σταθερή. Τα γρανάζια που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες με μεσοδιαστήματα έχουν ένα βήμα μείωσης και είναι απλά ή διπλά ελικοειδή.

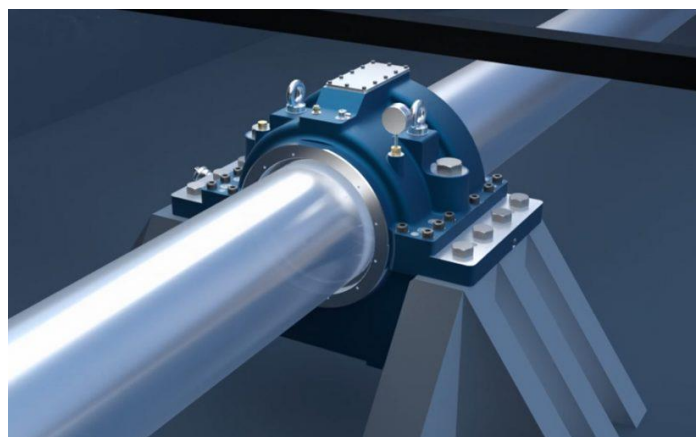
Για την επίτευξη της μείωσης της ταχύτητας, ο μηχανισμός με τα μικρά γρανάζια και μικρή διάμετρο τοποθετείται προφανώς στην πλευρά του κινητήρα και ο μεγάλος μηχανισμός στην πλευρά του άξονα των κινητήρων. Ο λόγος της μείωσης των περιστροφών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 4:1 αλλά συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 2:1 ή 2, 5:1. [19]

### 4.3. Ωστικά έδρανα

Τα έδρανα είναι τυποποιημένα στοιχεία μηχανών που χρησιμεύουν για την έδραση περιστρεφόμενων μηχανολογικών στοιχείων. Η κύρια λειτουργία τους είναι η παραλαβή ακτινικών-αξονικών φορτίων, η ελαχιστοποίηση της τριβής μεταξύ των κινούμενων μερών, η μείωση του θορύβου και των ταλαντώσεων και η αντοχή σε κρουστικά φορτία. Ωστόσο η λίπανση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική ώστε να διατηρούνται όσο το δυνατόν σε χαμηλά επίπεδα οι απώλειες τριβών και αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Όσον αφορά στη ναυπηγική, η σπουδαιότερη εφαρμογή των αξονικών εδράνων είναι το ωστικό έδρανο του αξονικού συστήματος πρόωσης του πλοίου.

Το συγκεκριμένο έδρανο χρησιμοποιεί έναν μοναδικό ωστικό δακτύλιο που περιστρέφεται μέσω ενός κατάλληλου αύλακα. Στις δύο πλευρές του αύλακα προσαρμόζονται ειδικά πέδιλα (thrust pad). Κάθε πέδιλο εδράζεται σε μια ειδική σφαιρική βάση, η οποία επιτρέπει την περιστροφή και μια μικρή γωνιακή μετατόπιση. Ανάμεσα στο δακτύλιο, τον αύλακα και τα πέδιλα παρεμβάλλεται λιπαντικό. Με την περιστροφή του δακτυλίου, τα πέδιλα μετακινούνται από την πίεση του λαδιού, έτσι ώστε να σχηματίζουν γωνία με το επίπεδο του δακτυλίου. Αυτή η γωνία βασίζεται στην υψηλή ταχύτητα περιστροφής του κοχλίου, το τμήμα του άξονα που βρίσκεται σε επαφή με το ρευστό. Λόγω αυτής της γωνίας δημιουργείται μια λιπαντική σφήνα, γνωστή ως υδροδυναμική λίπανση, η οποία αναλαμβάνει την ωστική δύναμη και αποτρέπει την επαφή του δακτυλίου με τις επιφάνειες των πέδινων.

Τα ωστικά έδρανα χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές υψηλού φορτίου, υψηλής ταχύτητας ή υψηλής ακρίβειας, όπου τα συνηθισμένα έδρανα έχουν σύντομη διάρκεια ζωής ή προκαλούν υψηλό θόρυβο και κραδασμούς. Η δύναμη που ασκεί η άτρακτος δεν είναι μόνο με κατεύθυνση όταν το πλοίο κινείται προς τα εμπρός αλλά και σε περίπτωση οπισθοπορείας. Για αυτό τον λόγο το ωστικό έδρανο περιλαμβάνει δύο έδρες πέδινων, ώστε σε κάθε περίπτωση να είναι σε θέση να λαμβάνει φορτία. Στην περίπτωση κανονικής πορείας, το έδρανο έχει δύο διατάξεις πέδινων γιατί η ώση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ώση σε ανάστροφη κίνηση, ωστόσο ο αριθμός των πέδινων εξαρτάται από το μέγεθος της ώσεως από την άτρακτο.



**Εικόνα 4.1** Ωστικό έδρανο και περίβλημα άτρακτου. [46]

#### 4.4. Περιβλημα άξονα

Το περίβλημα του άξονα βρίσκεται στην περιοχή της ατράκτου και χρησιμοποιείται για την απορρόφηση και μετάδοση των αξονικών φορτίων που παράγονται από την προπέλα ,στην δομή του πλοίου. Κατά την περιστροφή του πλοίου παράγονται αξονικές δυνάμεις οι οποίες μεταδίδονται κατά μήκος της ατράκτου και χωρίς την κατάλληλη υποστήριξη μπορεί να προκαλέσουν υπερβολική φθορά και ζημιά στα έδρανα και άλλα εξαρτήματα. Το περίβλημα άξονα σχεδιάζεται για να αντισταθμίσει αυτές τις δυνάμεις παρέχοντας μια σταθερή δομή υποστήριξης. Συνήθως βρίσκεται στο πίσω μέρος της ατράκτου κοντά στην προπέλα.

Η λίπανση του περιβλήματος του άξονα πραγματοποιείται στο κάτω μισό του περιβλήματος και ένας δακτύλιος ρίψης λαδιού βυθίζεται στο λάδι και το μεταφέρει γύρω από τον άξονα καθώς περιστρέφεται. Η ψύξη του εδράνου γίνεται με νερό που κυκλοφορεί μέσω ενός σωλήνα στο κάτω μέρος του περιβλήματος.

Το περίβλημα του άξονα είναι πακτωμένο στην δομή του πλοίου, εξασφαλίζοντας έτσι ότι τα αξονικά φορτία μεταδίδεται αποτελεσματικά στην καρίνα. Ο γενικός σκοπός του περιβλήματος είναι να υποστηρίξει και να σταθεροποιεί την άτρακτο, εξασφαλίζοντας ομαλή και αποδοτική κίνηση ενώ προστατεύει το σύστημα κίνησης από υπερβολικές αξονικές φορτίσεις.

#### 4.5. Τοποθέτηση Ατράκτου

Η χοάνη (ή αλλιώς στορέας) είναι η κατασκευή που βρίσκεται στην περιοχή που η άτρακτος διαπερνά το περίβλημα του πλοίου και είναι σταθερά τοποθετημένη επί του πλοίου. Η χοάνη περιλαμβάνει ένα τριβέα του άξονα και μια διάταξη στεγανότητας για την αποφυγή θαλάσσιου ύδατος στο πλοίο. Κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο στα εμπορικά πλοία και από χυτοχάλυβα στα πολεμικά.

Το περίβλημα της ατράκτου (στορέας) εξυπηρετεί δύο σημαντικούς σκοπούς. Υποστηρίζει το περίβλημα της ατράκτου και ένα ποσοστό του βάρους της προπέλας και λειτουργεί επίσης ως στυπιοθλιπτής για να εμποδίσει την είσοδο του νερού στο μηχανοστάσιο. Ο ρόλος των στυπιοθλιπτών είναι να εξασφαλίζουν την στεγανότητα της ατράκτου από το υδάτινο περιβάλλον.

Πρώιμες διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κατασκευασμένες από ξύλα που λιπαίνονταν από τα θαλάσσια ύδατα, τα πιο σύγχρονα πλοία χρησιμοποιούν ελαιολιπαντικές διατάξεις . [20]



## 5. ΜΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΠΡΩΩΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

### 5.1. Κατευθυνόμενο σύστημα Azimuth

Ένας προωθητήρας azimuth είναι μια διάταξη προπελών τοποθετημένες σε λοβούς οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να περιστραφούν προς οποιαδήποτε οριζόντια κατεύθυνση, καθιστώντας περιττό το πηδάλιο. Τα πλοία με αυτό το σύστημα παρέχουν μεγαλύτερη δυνατότητα ελιγμών από ένα σύστημα με σταθερή προπέλα και σύστημα πηδαλιουχίας και με μηχανική μετάδοση. Ο κινητήρας μπορεί να είναι diesel ή diesel-ηλεκτρικός. [21]

Ανάλογα με τη διάταξη του άξονα, ο μηχανικός προωθητής azimuth διαιρείται σε L drive και Z-drive. Ένας προωθητής μονάδας L έχει κατακόρυφο άξονα εισόδου και οριζόντιο άξονα εξόδου με έναν ορθογώνιο μηχανισμό. Ένας προωθητής Z-drive έχει οριζόντιο άξονα εισόδου, κατακόρυφο άξονα στην περιστρεφόμενη στήλη και οριζόντιο άξονα εξόδου με δύο ορθογώνιους άξονες και ηλεκτρική μετάδοση, όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται μέσα στον ίδιο σημείο, συνδεδεμένος απευθείας με την προπέλα χωρίς γρανάζια. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ενσωματωμένο κινητήρα, συνήθως με diesel ή αεριοστρόβιλο.

Οι προωθητήρες azimuth μπορούν να έχουν προπέλες σταθερού βήματος (fixed pitch propellers - FPP) ή προπέλες ελεγχόμενου βήματος (controllable pitch propellers - CPP). [21]



**Εικόνα 5.1** Κατευθυνόμενες προπέλες συστήματος αζιμούθιου. [21]

Οι ανασυρόμενοι προωθητήρες χρησιμοποιούνται ως βοηθητική πρόωση για την διατήρηση θέσης (dynamically positioned - DP) και για την πρόωση σε πολεμικά σκάφη. Οι υποβρύχιοι προωθητήρες χρησιμοποιούνται ως δυναμική πρόωση θέσης για πολύ μεγάλα σκάφη, όπως ημιυποβρύχιες εξέδρες γεώτρησης.

Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η ηλεκτρική απόδοση, η καλύτερη χρήση του χώρου των πλοίων και το χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Τα πλοία με προωθητήρες azimuth δε χρειάζονται ρυμουλκά για να αγκυροβολήσουν, αν και εξακολουθούν να απαιτούν ρυμουλκά για να κινηθούν σε δύσκολες τοποθεσίες.

## 5.2. Πρόωση με αντλία εκτόξευσης νερού

Η πρόωση με πίδακα νερού βασίζεται στην αρχή της δράσης-αντίδρασης. Η υδροδυναμική αντλία αξονικής ροής απορροφά νερό από το πίσω τμήμα του σκάφους και το εκτοξεύει, μέσω ρυθμιζόμενου ακροφυσίου, με υψηλή ταχύτητα προς τα πίσω. Η εκτόξευση του νερού προς τα πίσω δημιουργεί μια δύναμη προώθησης που κινεί το πλοίο προς τα εμπρός. Με τη βοήθεια πτερυγίων, αλλάζει η κατεύθυνση εκτόξευσης ροής του νερού με αποτέλεσμα την αλλαγή κατεύθυνση του σκάφους, και με την κάθοδο ενός ειδικού εκτροπέα το σκάφος κινείται προς τα πίσω.

Η μέθοδος πρόωσης με αντλία εκτόξευσης νερού επιτρέπει την εύκολη διαδικασία ελιγμών και ταυτόχρονα την παροχή υψηλών ταχυτήτων. Αντλίες πίδακα εντοπίζονται σε μικρά σκάφη, στα ποταμόπλοια για ρηχό νερό και στις τορπίλες, και το κύριο πλεονέκτημα τους είναι η εύκολη διαχείριση της κατεύθυνσης και η αποφυγή επιπλοκών μεταξύ προπέλας και άλλων αντικειμένων κατά την λειτουργία τους.[22]



**Εικόνα 5.2** Κινητήρας εκτόξευσης νερού (jet). [22]

## 5.3. Αιολική πρόωση

Η αιολική πρόωση προέκυψε ως εναλλακτική λύση στα συστήματα που εκπέμπουν τεράστιες ποσότητες αερίων CO<sub>2</sub> στη ατμόσφαιρα. Ωστόσο, η χρήση της αιολικής πρόωσης δεν έχει ξεκινήσει εκτενώς σε μεγάλα εμπορικά πλοία.

Ο “χαρταετός” (kite) είναι το κύριο σύστημα πρόωσης SkySails, ο οποίος εκτελεί τακτικά δυναμικούς ελιγμούς στο αέρα μπροστά από το πλοίο, δημιουργώντας μια δύναμη που κινεί το πλοίο. Ο έλεγχος λειτουργίας του συστήματος SkySails πραγματοποιείται στο σημείο διακυβέρνησης του πλοίου (γέφυρα) μέσω συστήματος υπολογιστή. Κατά την λειτουργία πτήσης το σύστημα αυτόματου πιλότου διασφαλίζει ότι ο χαρταετός κινείται με βάση την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου καθώς και την ταχύτητα του πλοίου, δημιουργώντας την βέλτιστη πρόωση. Η διαδικασία ανύψωσης και ανάκτησης είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και απαιτεί μόνο μερικές απλές ενέργειες που μπορούν να πραγματοποιηθούν από το κατάστρωμα του πλοίου.

Το σύστημα δοκιμάστηκε για πρώτη φορά στη Βαλτική Θάλασσα, πριν από την εμπορική εφαρμογή. Οι χαρταετοί, με επιφάνεια περίπου 320 τετραγωνικών μέτρων μπορούσαν να πετούν σε υψόμετρο 100-300 μέτρων (330-980 πόδια). Λόγω των ισχυρών ανέμων σε αυτά τα ύψη, λαμβάνουν σημαντικά υψηλότερη ώθηση ανά μονάδα επιφάνειας από τα συμβατικά ιστιοφόρα.

Ένα πλοίο εξοπλισμένο με τους σημερινούς Skysails θα μπορούσε να καταναλώσει από 10 έως 35% λιγότερα καύσιμα. Ένα συμβατικό πλοίο με σύστημα Skynavisails έχει δύο μεθόδους πρόωσης, καθιστώντας το ένα τύπου υβριδικού οχήματος. [23]



**Εικόνα 5.3** Πλοίο με χρήση του συστήματος πρόωσης Skysails. [47]

#### 5.4. Πρόωση με κυψέλες καύσιμου

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια διάταξη που μετατρέπει τη χημική ενέργεια από το καύσιμο σε ηλεκτρική μέσω χημικής αντίδρασης με οξυγόνο ή άλλο οξειδωτικό μέσο. Το υδρογόνο είναι το συνηθέστερο καύσιμο, αλλά ενίοτε χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες όπως το φυσικό αέριο και οι αλκοόλες όπως η μεθανόλη.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι διαφορετικές από τις μπαταρίες, καθώς απαιτούν σταθερή πηγή καυσίμου και οξυγόνου για να λειτουργούν, αλλά μπορούν να παράγουν συνεχώς ηλεκτρικό ρεύμα για όσο διάστημα παρέχονται αυτές οι εισροές. Ο φυσικός Γουίλιαμ Γκρόουβ ανέπτυξε τις πρώτες κυψέλες καυσίμου το 1839. Η πρώτη χρήση των κυψελών καυσίμου ήταν στα διαστημικά προγράμματα της NASA για την παραγωγή ενέργειας για ανιχνευτές, δορυφόρους και διαστημικές κάψουλες. Έκτοτε, οι κυψέλες καυσίμου έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές άλλες εφαρμογές.

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται για πρωτογενή και εφεδρική ενέργεια για εμπορικά, βιομηχανικά και οικιστικά κτίρια και σε απομακρυσμένες ή μη προσβάσιμες περιοχές. Χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία οχημάτων κυψελών καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων αυτοκινήτων, λεωφορείων, ανελκυστήρων, αεροπλάνων, σκαφών, μοτοσικλετών και υποβρυχίων.

Υπάρχουν πολλοί τύποι κυψελών καυσίμου, αλλά όλοι αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη που επιτρέπει τη μετακίνηση των φορτίων μεταξύ των δύο πλευρών της κυψέλης καυσίμου. Τα ηλεκτρόνια έλκονται από την άνοδο στην κάθοδο μέσω εξωτερικού κυκλώματος, το οποίο παράγει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα.

Καθώς η κύρια διαφορά μεταξύ των τύπων κυψελών καυσίμου είναι ο ηλεκτρολύτης, οι κυψέλες καυσίμου ταξινομούνται ανά τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν διάφορα μεγέθη. Οι μεμονωμένες κυψέλες καυσίμου παράγουν πολύ μικρές ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, περίπου 0.7 volt, έτσι ώστε οι κυψέλες να "στοιβάζονται" ή να τοποθετούνται σε

κυκλώματα σειράς ή παράλληλα, να αυξήσουν την τάση και την ένταση της παραγωγής, ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μιας εφαρμογής.

Εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια, οι κυψέλες καυσίμου παράγουν νερό, θερμότητα και ανάλογα με την πηγή καυσίμου, πολύ μικρές ποσότητες διοξειδίου του αζώτου και άλλων εκπομπών. Η ενεργειακή απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου είναι γενικά μεταξύ 40-60%, ή έως 85% αποδοτική εάν η θερμότητα των αποβλήτων συλλέγεται για χρήση. [24] [25]



**Εικόνα 5.4** Κινητήρας κυψελών καυσίμου. [25]

### 5.5. Πρόωση μέσω συλλογής ηλιακής ενέργειας

Η πρόωση μέσω συλλογής ηλιακής ενέργειας στα πλοία αναφέρεται στη χρήση ηλιακών συστημάτων για την παραγωγή ενέργειας που απαιτείται για την κίνηση του πλοίου. Αυτή η τεχνολογία εκμεταλλεύεται την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την κίνηση των μηχανισμών προώθησης του πλοίου. Οι τύποι συστημάτων πρόωσης μέσω συλλογής ηλιακής ενέργειας ποικίλλουν, αλλά η κύρια αρχή είναι η ακόλουθη:

- **Ηλιακά πάνελ:** Τοποθετούνται ηλιακά πάνελ (ή φωτοβολταϊκά πάνελ) στο πλοίο, συνήθως στην επιφάνεια του καταστρώματος, όπου εκτίθενται στον ήλιο. Τα ηλιακά πάνελ απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες ή χρησιμοποιείται άμεσα για την κίνηση του πλοίου.
- **Σύστημα αντλίας θερμότητας:** Σε ορισμένα πλοία, χρησιμοποιείται σύστημα αντλίας θερμότητας (heat pump) για να απορροφήσει τη θερμότητα από την ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμότητα αυτή μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και χρησιμοποιείται για την κίνηση του πλοίου.

Η πρόωση μέσω συλλογής ηλιακής ενέργειας στα πλοία αποτελεί μια περιβαλλοντικά φιλική εναλλακτική λύση, καθώς εκμεταλλεύεται μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και μειώνει την εξάρτηση

από τα παραδοσιακά καύσιμα. Ωστόσο, το επίπεδο της πρόωσης και η απόδοση μπορεί να εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας και τις τεχνικές λεπτομέρειες του κάθε συστήματος.



**Εικόνα 5.5** Πλοίο με σύστημα ηλιακής πρόωσης [26]

## **5.6. Προωστήριες μηχανές υγροποιημένου φυσικού αερίου**

Η χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) ως καυσίμου στα συστήματα πρόωσης των πλοίων αντιπροσωπεύει μια αναδυόμενη τάση στις τεχνολογίες προώθησης και θεωρείται ένα εξαιρετικά “καθαρό” καύσιμο που προκαλεί πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Σύμφωνα με ορισμένους ειδικούς, εκτιμάται ότι σε 5-10 χρόνια η πλειονότητα των πλοίων της ακτοπλοΐας που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα θα μεταβούν στη χρήση LNG.

Το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα άνθρακα σε σύγκριση με άλλα ορυκτά καύσιμα. Η περιεκτικότητα σε οξειδία αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) ανέρχεται στο 85%, ενώ οι εκπομπές διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_x$ ) και αιωρούμενων σωματιδίων στα καυσαέρια είναι αμελητέες. Επιπλέον, η μείωση των εκπομπών  $\text{CO}_2$  ανέρχεται σε περίπου 30% σε σύγκριση με τα καύσιμα diesel.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αποθέματα φυσικού αερίου είναι μεγαλύτερα από τα υπόλοιπα πετρελαϊκά αποθέματα, τα οποία μπορεί να εξαντληθούν σε περίπου 30-50 χρόνια. Με την ανάπτυξη υποδομών για φυσικό αέριο και την τεχνολογική πρόοδο, το LNG μπορεί να αναδειχθεί ως το καύσιμο του μέλλοντος.[26]

## 5.7. Μαγνητοϋδροδυναμική πρόωση

Η μαγνητοϋδροδυναμική πρόωση (magnetic hydrodynamic drive - MHD) είναι μια εξελιγμένη τεχνολογία πρόωσης που χρησιμοποιείται σε ορισμένα πλοία και υποβρύχια. Βασίζεται στην αρχή της μαγνητοϋδροδυναμικής δράσης, που συνδυάζει τις δυνάμεις της μαγνητικής και υδροδυναμικής δράσης για την παραγωγή πρόωσης.

Στη μαγνητοϋδροδυναμική πρόωση, ηλεκτρικό ρεύμα υψηλής έντασης διέρχεται μέσα από μαγνητικά πεδία, δημιουργώντας μια δύναμη που ασκείται στο νερό ή το υγρό μέσο στο οποίο κινείται το πλοίο. Αυτή η δύναμη προωθεί το πλοίο μπροστά, παρέχοντας κίνηση χωρίς τη χρήση σταθερών πτερυγίων ή προωστήρων. Έτσι, η μαγνητοϋδροδυναμική πρόωση παρέχει μια αθόρυβη, αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική μέθοδο προώθησης.

Η τεχνολογία αυτή είναι ακόμα σε ανάπτυξη και εφαρμογή, και υπάρχουν περιορισμοί και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ωστόσο, η μαγνητοϋδροδυναμική πρόωση έχει την δυνατότητα να προσφέρει σημαντικά οφέλη στην ακτοπλοΐα και στις θαλάσσιες εξερευνήσεις, όπως μείωση των εκπομπών ρύπων, βελτίωση της απόδοσης και αύξηση της ευελιξίας στην πρόωση των πλοίων.

Η εξίσωση που περιγράφει αυτή την προωθητική δύναμη είναι  $F_{\text{mag}} = I (L \times B)$  όπου  $L$  είναι το διάνυσμα προς την κατεύθυνση του τρέχοντος ρεύματος ( $I$ ) και το μήκος της απόστασης των τρεχόντων διαδρομών, ενώ με  $B$  συμβολίζεται το μαγνητικό πεδίο.

Το μείζον πρόβλημα με την MHD είναι ότι συγκριτικά με τις τρέχουσες τεχνολογίες είναι πιο ακριβή και πολύ πιο αργή από ένα σύστημα πρόωσης ατράκτου-προπέλας κινούμενο από κινητήρα. Ωστόσο το επιπλέον κόστος προέρχεται από την περίπλοκη μηχανική σχεδίαση και στη χρήση προηγμένων υλικών και τεχνολογιών που απαιτούνται για την κατασκευή του συστήματος μαγνητοϋδροδυναμικής πρόωσης. Επιπλέον, η εγκατάσταση και η συντήρηση του συστήματος απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό και εξοπλισμό, προκειμένου να διατηρηθεί η ομαλή λειτουργία και απόδοση του συστήματος. Όλα αυτά συντελούν στο επιπλέον κόστος συγκριτικά με άλλες μεθόδους πρόωσης όπως η χρήση προπέλας ή ηλεκτρικών κινητήρων. [26]

## 6. ΣΥΝΔΙΑΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΩΣΗΣ

Η συνδυασμένη χρήση διαφορετικών τύπων κινητήρων αποσκοπεί στην αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε τύπου μηχανής, λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες περιοχές λειτουργίας και απαιτήσεις ισχύος. Για παράδειγμα, οι αεριοστρόβιλοι κινητήρες παρουσιάζουν υψηλή απόδοση σε πλήρες φορτίο, αλλά χαμηλή απόδοση σε μερικό φορτίο σε σύγκριση με τους πετρελαιοκινητήρες. Αντίθετα, οι πετρελαιοκινητήρες εμφανίζουν υψηλή θερμική απόδοση σε όλο το εύρος στροφών, αλλά μπορεί να έχουν αυξημένο όγκο και βάρος για μια δεδομένη ισχύ. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες παρέχουν πρακτικά απεριόριστη αυτονομία, αλλά έχουν αυξημένο βάρος, κόστος και επικινδυνότητα, ενώ η εφαρμογή του περιορίζεται κυρίως σε πολεμικά πλοία. Οι διάφοροι τύποι μηχανών μπορούν να συνδυαστούν είτε με μηχανική σύζευξη μέσω μειωτήρων στροφών, είτε με ηλεκτρική σύζευξη μέσω ηλεκτρικής προώθησης.

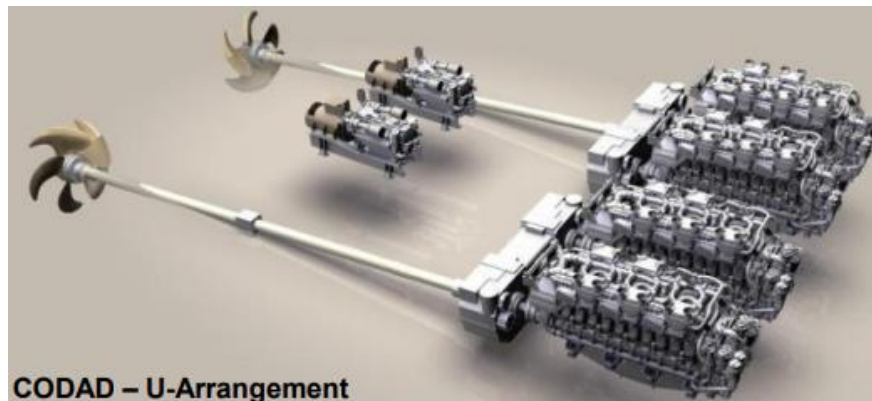
Αρχικά, τα συστήματα συνδυασμένης πρόωσης εισάχθηκαν ευρέως σε πολεμικά πλοία, όπου η επίτευξη υψηλών επιδόσεων αποτελούσε προτεραιότητα. Στη συνέχεια, επεκτάθηκαν σε πλοία αναψυχής και πλοία ακτοπλοΐας υψηλής απόδοσης. [38]

Τα κυριότερα συνδυασμένα συστήματα πρόωσης που συναντάμε χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με τον τύπο των μηχανών αλλά και με το είδος της σύνδεσής τους, επομένως είναι συστήματα με:

- Έναν τύπο μηχανών, όπως **CODAD** (combined diesel and diesel), **COGAG** (combined gas turbine and gas turbine), **CONAN** (combined nuclear and nuclear)
- Δύο τύπους μηχανών, **CODOG** (combined diesel or gas), **CODAG** (combined diesel and gas), **COGAS** (combined gas and steam), **CONAS** (combined nuclear and steam), **CONAG** (combined nuclear and gas), **COSAG** (combined steam and gas)
- Διαγώνια σύνδεση μηχανών, **CODOGX**, **CODAGX**, **CODADX**, **COGAGX**, **COGAGX-DX**, όπου με "X" συμβολίζεται η διαγώνια σύνδεση των συστημάτων πρόωσης με τις προπελοφόρους άξονες.

## 6.1 Συνδυασμός πετρελαιοκινητήρων (CODAD)

Το σύστημα CODAD (Combined Diesel And Diesel) αναφέρεται σε ένα σύστημα πρόωσης για πλοία, όπου δύο πετρελαιοκινητήρες χρησιμοποιούνται για να παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ προώθησης σε κάθε άξονα, με τη χρήση μειωτήρα και συμπλεκτών. Οι πετρελαιοκινητήρες μπορούν να έχουν την ίδια ή διαφορετική ισχύ. Αυτό επιτρέπει τη χρήση μικρότερης ισχύος πετρελαιοκινητήρων για χαμηλές ταχύτητες πλοήγησης ή μεγαλύτερης ισχύος πετρελαιοκινητήρων για υψηλές ταχύτητες πλοήγησης, καθώς και οποιαδήποτε συνδυασμός ανάμεσα σε αυτά. Συνήθως, στις φρεγάτες, οι πετρελαιοκινητήρες τοποθετούνται μαζί με τον μειωτήρα σε ένα ξεχωριστό χώρο του πλοίου. Οι συνδεόμενοι άξονες εξοπλίζονται με προπέλες μεταβλητού βήματος (CPPs), που επιτρέπουν στο πλοίο να επιτυγχάνει με ταχύτητες άνω των 30 κόμβων. [38]



**Εικόνα 6.1** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης CODAD. [38]

Ορισμένα πλεονεκτήματα του συστήματος πρόωσης CODAD:

1. Ευελιξία στην επιλογή ισχύος: Το σύστημα CODAD επιτρέπει τη χρήση πετρελαιοκινητήρων με διαφορετικές ισχύς, επιτρέποντας έτσι την προσαρμογή της πρόωσης σε διάφορες ταχύτητες πλοήγησης, έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας.
2. Οικονομία καυσίμων: Το CODAD επιτρέπει τη χρήση μικρότερων κινητήρων για χαμηλές ταχύτητες, όπου η μεγάλη ισχύς δεν είναι απαραίτητη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμων.
3. Υψηλές ταχύτητες: Το CODAD μπορεί να χρησιμοποιήσει πετρελαιοκινητήρες μεγάλης ισχύος για να επιτύχει υψηλές ταχύτητες πλοήγησης, όταν απαιτείται.
4. Αξιοπιστία και αποδοτικότητα: Οι δύο ανεξάρτητοι πετρελαιοκινητήρες του CODAD παρέχουν αξιόπιστη λειτουργία και ευελιξία στη συντήρηση. Αν κάποιος από τους κινητήρες υποστεί βλάβη, ο άλλος μπορεί να συνεχίσει να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για την πλοήγηση.
5. Αθόρυβη λειτουργία: Οι πετρελαιοκινητήρες CODAD λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες, παρέχοντας αθόρυβη λειτουργία και μείωση του θορύβου που εκπέμπεται από το σκάφος.



## 6.2 Συνδυασμοί αεροστροβίλων και πετρελαιοκινητήρων

Τα συστήματα πρόωσης με τον συνδυασμό πετρελαιοκινητήρων και αεροστροβίλων, έχει ως αποτέλεσμα την εκμετάλλευση των δύο διαφορετικών τύπων μηχανών, σε περιπτώσεις που διαφέρουν η συνθήκες και οι περιοχές λειτουργίας. Στην περίπτωση των αεροστροβίλων γίνεται η χρήση για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων, ενώ στην περίπτωση των πετρελαιοκινητήρων γίνεται αξιοποίηση της δυνατότητας αυτών να προσφέρουν πλεύση με χαμηλό κόστος και μέγιστη αυτονομία.

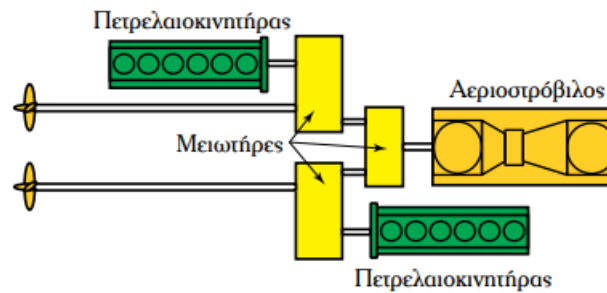
### 6.2.1 Σύστημα πρόωσης CODAG

Το σύστημα CODAG ( Combined Diesel And Gas) αποτελείται από τον συνδυασμό πετρελαιοκινητήρων και αεροστροβίλων, οι οποίοι παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ για την κίνηση των προπελοφόρων αξόνων του πλοίου μέσω μειωτήρων στροφών. Οι πετρελαιοκινητήρες είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τους άξονες που φέρουν τις προπέλες, και η κίνηση του πλοίου πραγματοποιείται μόνο μέσω αυτών για ένα συγκεκριμένο όριο ταχύτητας. Με σκοπό την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων συμπλέκονται και οι αεροστροβίλοι και λειτουργούν ταυτόχρονα με τους πετρελαιοκινητήρες.

Η σύνδεση των δύο τύπου κινητήρων με τους άξονες των προπελών πραγματοποιείται μέσω μειωτήρων στροφών και συμπλεκτών. Στην συνηθέστερη περίπτωση η διάταξη ενός τέτοιου συστήματος αποτελείται από δύο προπέλες μεταβλητού βήματος και η κίνηση του παρέχεται από δύο πετρελαιοκινητήρες και έναν αεροστροβίλο. Οι περιπτώσεις λειτουργίας του προαναφερόμενου συστήματος είναι:

- Η παροχή της απαιτούμενης ενέργειας για την κίνηση των δύο προπελών, με τη λειτουργία μόνο ενός πετρελαιοκινητήρα.
- Η παροχή της απαιτούμενης ενέργειας για την κίνηση των δύο προπελών, με την λειτουργία και των δύο πετρελαιοκινητήρων, όπου κάθε κινητήρας κινεί ανεξάρτητα την αντίστοιχη προπέλα. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η κάθε προπέλα μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικό αριθμό στροφών με αποτέλεσμα αυξημένη ικανότητα ελιγμών.
- Η κίνηση των δύο προπελών παρέχεται μόνο μέσω της λειτουργίας του αεροστροβίλου. Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός περιστροφής των προπελών είναι ίδιος, ενώ για περιπτώσεις ελιγμών η δυνατότητα παρέχεται από τις προπέλες μεταβλητού βήματος.
- Τελευταία περίπτωση είναι η ταυτόχρονη λειτουργία των πετρελαιοκινητήρων και του αεροστροβίλου, με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης ταχύτητας.

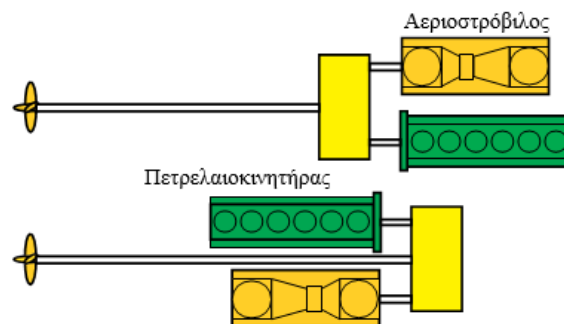
Το σύστημα CODAG σε σύγκριση με το σύστημα CODOG ( αναφέρεται παρακάτω) ,έχει μικρότερο συνολικό βάρος εγκατάστασης παρέχοντας υψηλό λόγο ισχύος προς βάρος, ενώ ταυτόχρονα καταλαμβάνει μειωμένο όγκο στο μηχανοστάσιο καθιστώντας το βέλτιστη επιλογή για σκάφη μικρού εκτοπίσματος. [38]



Εικόνα 6.2 Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης CODAG. [38]

### 6.2.2 Σύστημα πρόωσης CODOG

Στο σύστημα CODOG (Combined Diesel Or Gas), οι αεριοστρόβιλοι λειτουργούν ανεξάρτητα χωρίς την χρήση των πετρελαιοκινητήρων. Επομένως σε περιπτώσεις που το πλοίο πλέει σε χαμηλή ταχύτητα η απαιτούμενη ισχύς παράγεται αποκλειστικά από τους πετρελαιοκινητήρες, ενώ οι αεριοστρόβιλοι θα λειτουργήσουν μεμονωμένα σε περίπτωση που υψηλές ταχύτητες απαιτούνται. Λόγω της ανεξάρτητης λειτουργίας των αεριοστροβίλων όταν οι πετρελαιοκινητήρες δεν εμπλέκονται, απαιτούνται αεριοστρόβιλοι μεγαλύτερου μεγέθους για την παραγωγή ισχύος από ότι χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα CODAG. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εγκατάστασης και την καταβολή μεγαλύτερου όγκου στο μηχανοστάσιο το οποίο οδηγεί στην απαίτηση μεγαλύτερου μεγέθους μηχανοστάσιο. Η διάταξη των μειωτήρων είναι πιο απλή και καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο, κοστίζουν λιγότερο ενώ το επίπεδο ηχορύπανσης είναι πιο χαμηλό. Το σύστημα αυτό αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και των δύο τύπων κινητήρα, όπου κατά την λειτουργία των πετρελαιοκινητήρων σε χαμηλές ταχύτητες εξασφαλίζεται η μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και η μεγάλη αυτονομία, ενώ κατά την λειτουργία των αεριοστροβίλων η κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται, αλλά εξασφαλίζεται η πλεύση του πλοίου σε υψηλές ταχύτητες. Η ανάγκη πλεύσης σε υψηλές ταχύτητες στα πολεμικά πλοία περίπου 15% του συνολικού χρόνου λειτουργίας τους. [38]

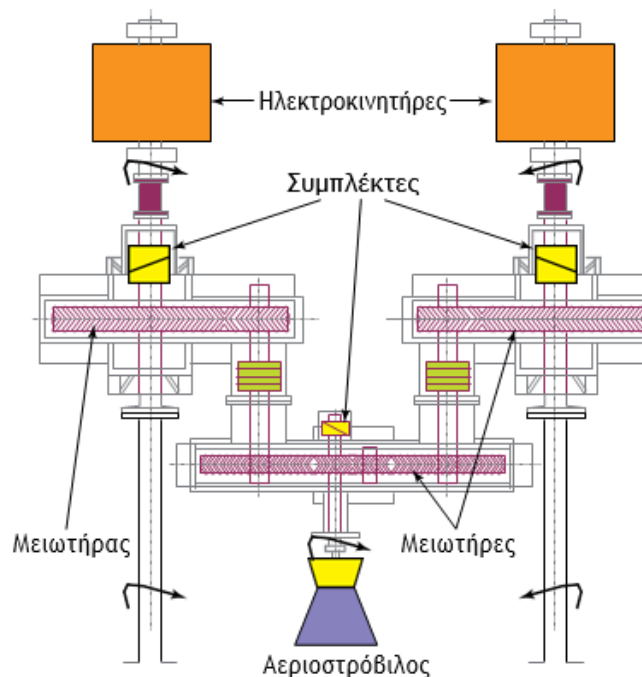


Εικόνα 6.3 Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης CODOG. [38]

### 6.2.3 Σύστημα πρόωσης CODLAG

Στο σύστημα CODLAG (Combined Diesel eLectric And Gas), χρησιμοποιούνται πετρελαιοκινητήρες όπου συνδέονται με ηλεκτρογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και τροφοδοτούν τους προπελοφόρους άξονες παρέχοντας ταχύτητες πλεύσης με μειωμένο κόστος. Στους άξονες συνδέονται και οι αεριοστρόβιλοι όπου εμπλέκονται σε περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων. Το παραγόμενο ρεύμα από τις ηλεκτρογεννήτριες χρησιμοποιείται και για τις υπόλοιπες ανάγκες του πλοίου. Ωστόσο η πλεύση σε υψηλές ταχύτητες καταλαμβάνει μικρό ποσοστό στον συνολικό χρόνο

πλεύσης του πλοίου, επομένως οι πετρελαιοκινητήρες είναι το κύριο μέσω που χρησιμοποιείται και στο οποίο ασκείται μεγαλύτερη καταπόνηση. Λόγω της σύνδεσης πετρελαιοκινητήρων-ηλεκτρογεννητριών, οι κινητήρες πετρελαίου λειτουργούν σε σταθερές στροφές με αποτέλεσμα την μείωση της καταπόνησης που δέχονται, την μείωση των παραγόμενων ρύπων και την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης. Το σύστημα αυτό παρέχει την δυνατότητα πλεύσης του πλοίου σε πολύ χαμηλές ταχύτητες μέσω της ηλεκτρικής πρόωσης μειώνοντας τα επίπεδα θορύβου και αποτελεί ένα εξίσου σημαντικό παράγοντα για τα πολεμικά πλοία. Σχετικά με την εγκατάσταση ενός συστήματος CODLAG, παρέχεται μεγαλύτερη ευκολία στην σχεδίαση του μηχανοστασίου καθώς δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης πετρελαιοκινητήρων σε διαφορετικά σημεία του πλοίου όπου συνδέονται με τις ηλεκτρογεννήτριες, και χρησιμοποιούνται για την παροχή ισχύος στους άξονες των προπελών αλλά και για την τροφοδοσία με ηλεκτρικό ρεύμα για τις υπόλοιπες λειτουργίες του πλοίου χωρίς να χρειάζεται εγκατάσταση άλλων ηλεκτρομηχανών. [38]

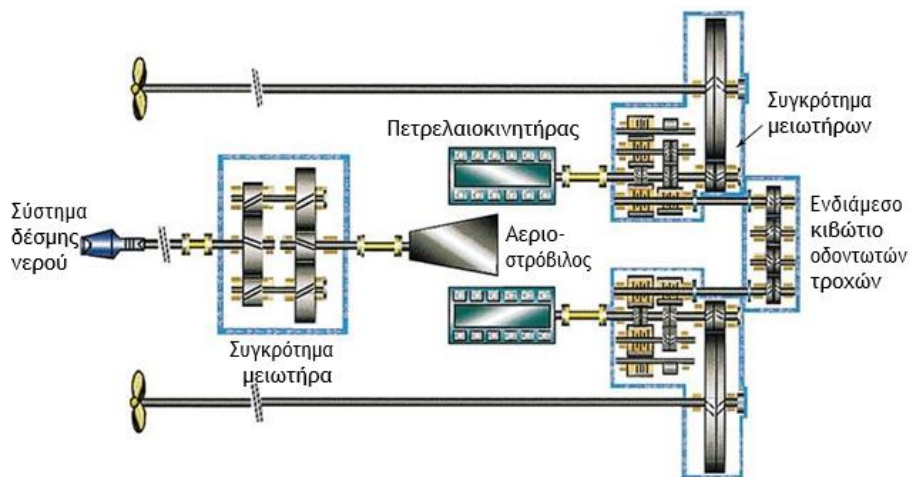


**Εικόνα 6.4** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης CODLAG. [38]

#### 6.2.4 Σύστημα πρόωσης CODAG-WARP

Το σύστημα CODAG-WARP (Water jet And Refined Propeller), αποτελείται από πετρελαιοκινητήρες που προσδίδουν την απαιτούμενη ισχύ για την κίνηση των προπελών του πλοίου μέσω της σύνδεσής τους με τους αντίστοιχους άξονες, και τον αεριοστρόβιλο που τροφοδοτεί αποκλειστικά το σύστημα δέσμης νερού. Επομένως οι δύο διαφορετικού τύπου κινητήρες μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα χωρίς κάποια σύνδεση μεταξύ τους καθώς προσδίδουν ισχύ σε διαφορετικές διατάξεις. Η ανεξάρτητη λειτουργία των δύο διατάξεων (αεριοστρόβιλου και πετρελαιοκινητήρων) προσφέρει διαφορετικές επιλογές σχετικά με την διαχείριση των φορτίων και την πρόωση και προσαρμόζεται στις ανάγκες του πλοίου. Οι πετρελαιοκινητήρες μπορούν να παράγουν την απαιτούμενη ισχύ με ταυτόχρονη λειτουργία και των δύο, η οποία προσδίδεται στους αντίστοιχους προπελοφόρους άξονες μέσω του μειωτήρα.

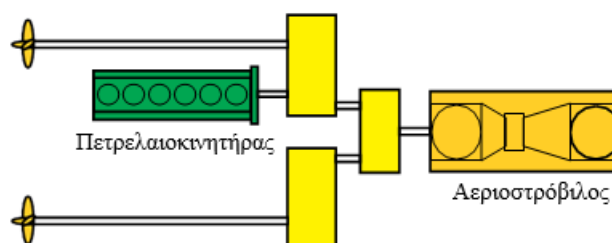
Ακόμη υπάρχει και η δυνατότητα της λειτουργίας μόνο ενός από τους δύο πετρελαιοκινητήρες, προσδίδοντας ισχύ και στους δύο άξονες μέσω του κιβωτίου οδοντωτών τροχών κινώντας τις δύο προπέλες με στις ίδιες στροφές. Για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων ,ενεργοποιείται ο αεριοστρόβιλος προσδίδοντας ισχύ στο σύστημα δέσμης νερού. Το σύστημα δέσμης νερού παρέχει υψηλές ταχύτητες σε μικρό χρονικό διάστημα. Ένα πλεονέκτημα του συστήματος δέσμης νερού είναι η δυνατότητα ελιγμών σε υψηλές ταχύτητες μέσω της ικανότητας αλλαγής κατεύθυνσης της δέσμης νερού. [38]



**Εικόνα 6.5** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης CODAG-WARP. [38]

### 6.2.5 Συστήματα πρόωσης CODOGX & CODAGX

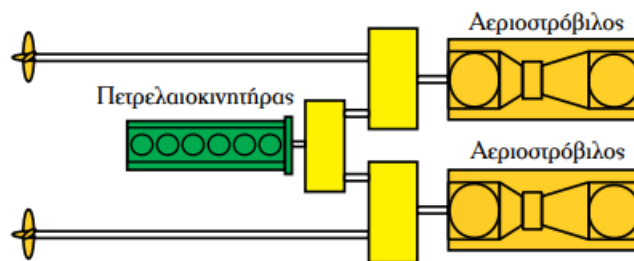
Τα συστήματα CODOGX και CODAGX αποτελούνται από τον συνδυασμό λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου και πετρελαιοκινητήρα παρέχοντας ισχύ στους δύο προπελοφόρους άξονες για την πλεύση του πλοίου. Στην περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης η απαιτούμενη ισχύς παρέχεται αποκλειστικά από τον πετρελαιοκινητήρα , ενώ ο αεριοστρόβιλος δεν λειτουργεί. Ο αεριοστρόβιλος εμπλέκεται μόνο για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων ενώ ο πετρελαιοκινητήρας είναι απομονώνεται. Αντίθετα στο σύστημα πρόωσης CODAGX , σε υψηλές ταχύτητες πλεύσης απαιτούμενη ισχύς παρέχεται από την ταυτόχρονη λειτουργία των δύο κινητήρων. Το σύστημα αυτό εφαρμόζεται κυρίως σε περιπολικά σκάφη και ταχύπλοα. Μερικά μειονεκτήματα είναι το υψηλό βάρος των μειωτήρων και οι αυξημένες μηχανικές απώλειες στην διάταξη των μειωτήρων. [38]



**Εικόνα 6.6** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης CODOGX και CODAGX. [38]

### 6.2.6 Σύστημα πρόωσης COGAGX-DX

Το σύστημα COGAGX-DX αποτελείται από τον συνδυασμό δύο αεροστροβίλων και ενός πετρελαιοκινητήρα και συνδέονται μέσω του μειωτήρων στους άξονες που βρίσκονται οι προπέλες. Στο σύστημα αυτό παρατηρούνται τρεις περιπτώσεις λειτουργίας. Στην περίπτωση πλεύσης χαμηλών ταχυτήτων ενεργοποιείται μόνο ο πετρελαιοκινητήρας ο οποίος κινεί τις προπέλες με τις ίδιες στροφές και συνεπώς με την ίδια ταχύτητα. Είναι κατανοητό ότι ο πετρελαιοκινητήρας σε ένα τέτοιο σύστημα επιβαρύνεται περισσότερο από ότι στο σύστημα CODAG. Σε περίπτωση που απαιτείται υψηλή ταχύτητα πλεύσης, η απαιτούμενη ισχύς τροφοδοτείται στους άξονες μέσω των μειωτήρων αποκλειστικά από την λειτουργία των δύο αεροστροβίλων. Ωστόσο για την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων εμπλέκεται ο πετρελαιοκινητήρας σε ταυτόχρονη λειτουργία με έναν ή δύο αεροστροβίλους. Στο σύστημα παρατηρούνται μειονεκτήματα όπως αυξημένο βάρος και απώλειες στην διάταξη των μειωτήρων. [38]



Εικόνα 6.7 Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης COGAGX-DX. [38]

### 6.3 Συνδυασμοί αεροστροβίλων στα συστήματα πρόωσης

Οι αεροστροβίλοι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα στον τομέα της πρόωσης πολεμικών πλοίων. Ένα από τα πλεονεκτήματα είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος, δηλαδή η μεγάλη ισχύς σε σχέση με τον όγκο τους. Επίσης, λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς κραδασμούς, και μπορούν να λειτουργήσουν αξιόπιστα για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Είναι εύκολο να αντικατασταθούν γρήγορα και η ευκολία εκκίνησης τους προσφέρει τη μέγιστη ισχύ σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της γρήγορης εκκίνησης που επιτυγχάνεται με τη χρήση αεροστροβίλων είναι οι φρεγάτες κλάσης "Ελλη" (Standard) του Πολεμικού Ναυτικού. Αυτά τα πλοία μπορούν να επιταχύνουν από στάση σε 30 κόμβους σε μόλις 75 δευτερόλεπτα, χρησιμοποιώντας την ισχύ των δύο αεροστροβίλων τύπου Rolls-Royce Olympus.

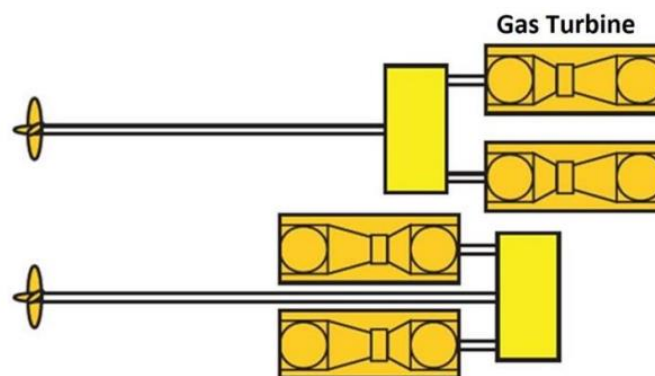
Επιπλέον, το μικρό μέγεθος των αεροστροβίλων για μια δεδομένη ισχύ προσφέρει πλεονέκτημα, ιδίως στα μεγάλα πλοία αναψυχής, όπου ο χώρος είναι περιορισμένος και η μείωση της στάθμης θορύβου είναι σημαντική παράμετρος επιλογής για το σύστημα πρόωσης. Επίσης, σε αυτές τις εφαρμογές, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των αεροστροβίλων είναι η επίτευξη πολύ χαμηλών επιπέδων καπνού στα καυσάερια, λόγω της αποτελεσματικής καύσης και της μεγάλης παροχής αέρα.

Συνεπώς, παρά τον χαμηλό βαθμό απόδοσής τους σε σύγκριση με τους πετρελαιοκινητήρες, υπάρχει ζήτηση για συστήματα πρόωσης που βασίζονται αποκλειστικά σε αεροστροβίλους. [38]

### 6.3.1 Συνδυασμός αεριοστροβίλων (COGAG)

Το σύστημα (Combined Gas And Gas) αποτελείται από αεριοστρόβιλους που συνδέονται μεταξύ τους και με τους προπελοφόρους άξονες μέσω μειωτήρων και συμπλεκτών. Σε περιπτώσεις χαμηλών ή υψηλών ταχυτήτων, μέρος ή όλοι οι αεριοστρόβιλοι εμπλέκονται αντίστοιχα. Οι αεριοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι ίδιου ή διαφορετικού τύπου, ώστε για χαμηλές απαιτήσεις ισχύος να χρησιμοποιούνται μικρότερα και με χαμηλότερο κόστος μοντέλα αεριοστροβίλων. Συνήθης πρακτική είναι η χρήση δύο ζευγών αεριοστροβίλων, κυρίως σε πολεμικά πλοία, καθένα από τα οποία κινεί μέσω μειωτήρα έναν άξονα το τέλος του οποίου φέρει μια προπέλα. Κατά τις χαμηλές ταχύτητες, λειτουργεί ένας αεριοστρόβιλος για κάθε προπέλα, ενώ για υψηλές ταχύτητες εμπλέκονται και οι δύο αεριοστρόβιλοι ανά άξονα. Επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου λειτουργίας αφορά την κίνηση του πλοίου με δύο μόνο αεριοστρόβιλους, για λόγους που αφορούν την ομοιόμορφη φθορά, οι αεριοστρόβιλοι κάθε ζεύγους εναλλάσσονται σε λειτουργία με βάση συγκεκριμένο πρόγραμμα ωρών λειτουργίας. Επειδή οι αεριοστρόβιλοι δεν μπορούν να αλλάξουν φορά περιστροφής, συνδυάζονται πάντα με προπέλες μεταβλητού βήματος.

Το σύστημα COGAG αποτελεί μια ευέλικτη λύση για τα συστήματα πρόωσης πλοίων, προσφέροντας υψηλή απόδοση σε όλο το εύρος της ισχύος. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτού του συστήματος είναι η κλάση φρεγατών Τύπου 22 του Βρετανικού Βασιλικού Ναυτικού, όπου η ισχύς παρέχεται από δύο διαφορετικά ζεύγη τύπου αεριοστροβίλων, Rolls-Royce Spey SM1A και Rolls-Royce Tyne RM1C, και όπου κάθε κινητήρας συνδέεται με μία από τις δύο προπέλες του πλοίου μέσω του άξονα.



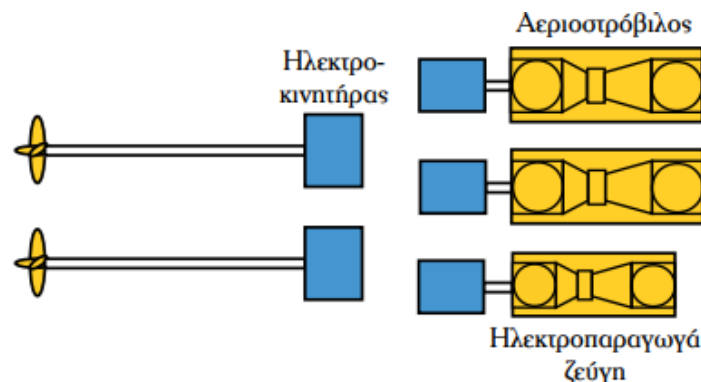
**Εικόνα 6.8** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης COGAG. [38]

Το σύστημα IGTE (Integrated Gas Turbine Electric) αποτελεί μια εξέλιξη του συστήματος COGAG. Στο σύστημα IGTE, οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται ως ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, παρέχοντας ισχύ για την πρόωση του πλοίου, καθώς και για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του. Με τη χρήση ηλεκτρικής πρόωσης, επιτυγχάνονται πλεονεκτήματα όπως η μείωση του θορύβου λειτουργίας, η αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και η ευελιξία στην τοποθέτηση των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών στο πλοίο.

Στο σύστημα IGTE, μπορεί να εγκατασταθούν διαφορετικοί τύποι αεριοστροβίλων με διαφορετικές ισχύς, και ανάλογα με τις ηλεκτρικές ανάγκες και την επιθυμητή ταχύτητα πλεύσης ενεργοποιείται η λειτουργία των αντίστοιχων αεριοστροβίλων. Η απουσία μηχανικών μειωτήρων στο σύστημα IGTE συμβάλλει στην αύξηση της συνολικής απόδοσης και στη μείωση του θορύβου. Επίσης, η ευκολία

ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης των αεριοστροβίλων επιτρέπει τον βέλτιστο συνδυασμό των ενεργών κινητήρων για την επίτευξη υψηλής απόδοσης.

Το σύστημα IGTE εφαρμόζεται κυρίως σε πλοία αναψυχής, όπου υπάρχουν αυξημένες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, χαμηλά επίπεδα θορύβου, μικρό μέγεθος μηχανοστασίου και χαμηλές εκπομπές ρύπων. Αν και ο υψηλός βαθμός απόδοσης δεν είναι πρωταρχική απαίτηση σε αυτούς τους τύπους πλοίων, οι αεριοστροβίλοι λειτουργούν σε σταθερές στροφές, στην περιοχή της βέλτιστης απόδοσής τους. [38]

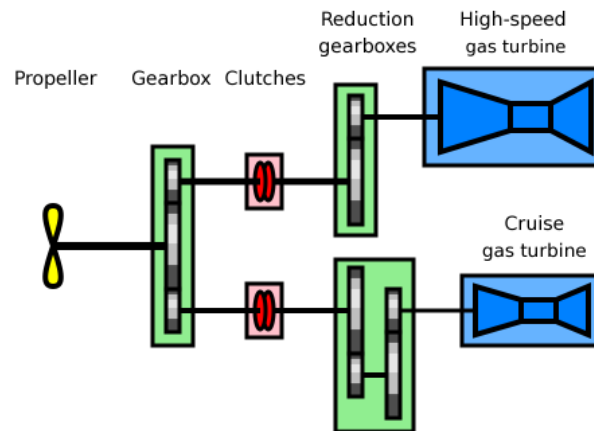


**Εικόνα 6.9** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης IGTE. [38]

### 6.3.2 Συνδυασμός αεριοστροβίλων (COGOG)

Στο σύστημα (Combined Gas Or Gas) χρησιμοποιούνται διάφοροι αεριοστροβίλοι για να επιτευχθούν χαμηλές και υψηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση των διπλών προπελοφόρων αξόνων, μπορεί να υπάρχει ένα ζεύγος αεριοστροβίλων χαμηλής ισχύος για την πλεύση με χαμηλή ταχύτητα. Κάθε αεριοστροβίλος μεταφέρει κίνηση σε έναν από τους άξονες μέσω συμπλέκτη και μειωτήρα. Για υψηλές ταχύτητες, αποσυνδέονται οι δύο χαμηλής ισχύος αεριοστροβίλοι και δύο υψηλής ισχύος αεριοστροβίλοι εμπλέκονται στους αντίστοιχους άξονες. Ένα παράδειγμα είναι η κλάση φρεγατών "Ελλη" του Πολεμικού Ναυτικού, η οποία διαθέτει δύο αεριοστροβίλους Rolls-Royce Tyne RM1C (8.000 shaft hp) για την πλεύση και δύο αεριοστροβίλους Rolls-Royce Olympus TM3B (50.000 shaft hp) για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων και γρήγορων εκκινήσεων.

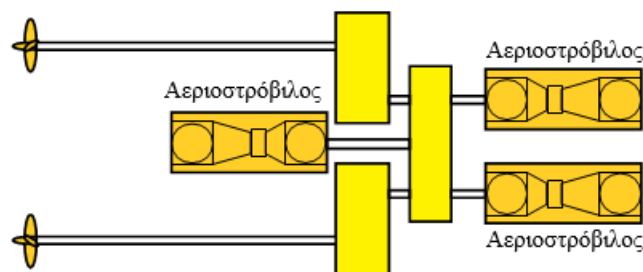
Για την λειτουργία αυτού του συστήματος, απαιτείται μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς στο μηχανοστάσιο σε σχέση με το σύστημα COGAG, διότι οι μικροί αεριοστροβίλοι δεν παράγουν αρκετή ισχύ στη μέγιστη λειτουργία τους. Επιπλέον, απαιτείται υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συνήθως μεγαλύτερο μέγεθος μηχανοστασίου. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι μικροί αεριοστροβίλοι χρησιμοποιούνται για οικονομική πλεύση λειτουργώντας σε υψηλό φορτίο, παρουσιάζουν υψηλή απόδοση σε σύγκριση με τους μεγαλύτερους αεριοστροβίλους που λειτουργούν με μειωμένο φορτίο. Γενικά, το σύστημα COGOG επιδεικνύει υψηλότερη απόδοση από το σύστημα COGAG. [38]



**Εικόνα 6.10** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης COGOG. [48]

### 6.3.3 Σύστημα πρόωσης COGAGX

Στο σύστημα COGAGX, δύο ή τρεις αεριοστρόβιλοι συνδέονται διαγώνια για να κινήσουν δύο προπελοφόρους άξονες. Η προσθήκη ενός επιπλέον συστήματος μειωτήρων που συνδέει τους δύο άξονες αυξάνει το βάρος, τον όγκο και το κόστος κατασκευής, ενώ επίσης αυξάνονται οι μηχανικές απώλειες. Ωστόσο, αυτό επιτρέπει καλύτερο συνδυασμό των αεριοστροβίλων και παρέχει περισσότερες επιλογές όσον αφορά την ισχύ, χρησιμοποιώντας λιγότερους κινητήρες σε σύγκριση με τα συστήματα COGAG. [38]



**Εικόνα 6.11** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης COGAGX. [38]

## 6.4 Άλλα συνδυαστικά συστήματα πρόωσης

Επιπλέον, υπάρχουν και συνδυασμοί των αεριοστροβίλων με ατμοστροβίλους και πυρηνικούς αντιδραστήρες, αν και οι εφαρμογές τους είναι περιορισμένες. Ας αναφερθούμε τώρα στα πιο κλασικά από αυτά τα συστήματα.

### 6.4.1 Σύστημα πρόωσης COGAS

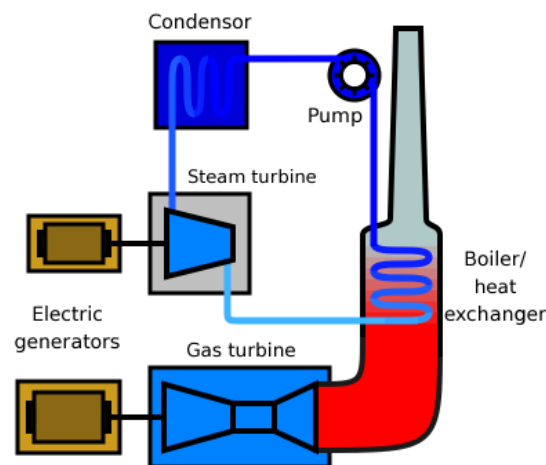
Το COGAS (Combined Gas And Steam), είναι ένα σύστημα πρόωσης που αποτελείται από τον συνδυασμό αεριοστροβίλων και με ατμοστρόβιλο. Το σύστημα διαθέτει έναν λέβητα καυσαερίων ο οποίος συνδυάζεται με τον ατμοστρόβιλο, και αξιοποιεί μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων των αεριοστροβίλων για τη θέρμανση νερού και την παραγωγή ατμού. Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί ταχύτητα πλεύσης με χαμηλό κόστος, ενώ ο



ατμοστρόβιλος χρησιμοποιείται για να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες. Ο παράγονται ατμός χρησιμοποιείται επίσης για άλλες ανάγκες στο πλοίο. Η αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων αυξάνει τη συνολική απόδοση του συστήματος. [38]

#### 6.4.2 Σύστημα πρόωσης COGES

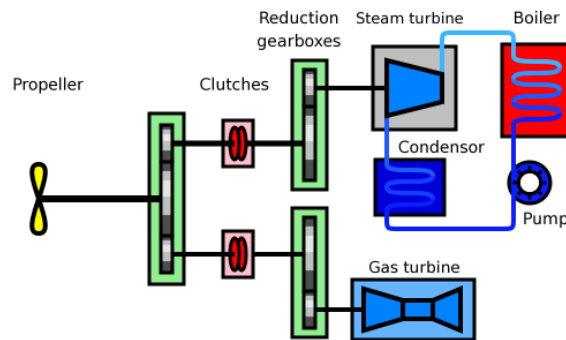
Το σύστημα COGES (Combined Gas Electric Steam), πρόκειται για παραλλαγή του συστήματος COGAS, και πρακτικά αφορά ένα σύστημα στο οποίο ο ατμοστρόβιλος και οι αεριοστρόβιλοι συνδέονται με ηλεκτρογεννήτριες με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η κίνηση των προπελών επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτροκινητήρων. Αυτό το σύστημα εφαρμόζεται σε μεγάλα σύγχρονα πλοία αναψυχής, όπου οι απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια είναι υψηλές, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται χαμηλό επίπεδο καπνού και θορύβου. [38]



Εικόνα 6.12 Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης COGES. [49]

#### 6.4.3 Σύστημα πρόωσης COSAG

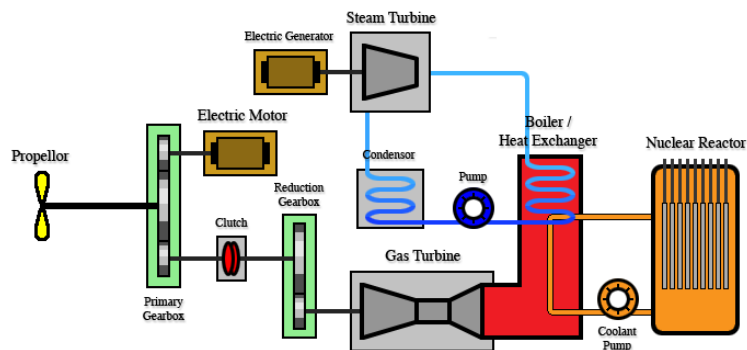
Το σύστημα COSAG (Combined Steam And Gas) χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό λεβήτων και ατμοστρόβιλου για να επιτύχει ταχύτητες πλεύσης με μειωμένο κόστος, ενώ για υψηλές ταχύτητες χρησιμοποιούνται επίσης αεριοστρόβιλοι παράλληλα με τον ατμοστρόβιλο. Ωστόσο λόγω του αυξημένου βάρους και όγκου αλλά και του χαμηλού βαθμού απόδοσης, το σύστημα αυτό δεν χρησιμοποιείται πλέον. Το COSAG χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν στην κλάση αντιτορπιλικών County και στην κλάση φρεγατών Tribal του Βρετανικού Βασιλικού Ναυτικού. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε στο Ισπανικό αεροπλανοφόρο Dedalo. [38]



**Εικόνα 6.13** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης COSAG. [50]

#### 6.4.4 Σύστημα πρόωσης CONAG

Το σύστημα CONAG (Combined Nuclear And Gas) διαθέτει έναν πυρηνικό αντιδραστήρα για την όπου συνδέεται με τον ατμοστρόβιλο και τον τροφοδοτεί ατμό, η χρήση του αντιδραστήρα επιτυγχάνει χαμηλές ταχύτητες πλεύσης ενώ για την λειτουργία του πλοίου σε υψηλές ταχύτητες χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα και οι αεριοστρόβιλοι. Το σύστημα CONAG προσφέρει πλεονεκτήματα συγκριτικά με την μεμονωμένη χρήση πυρηνικής ενέργειας για πρόωση. Αυτά περιλαμβάνουν το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και μέγεθος, ενώ παρέχει υψηλή αυτονομία και αυτό συμβαίνει διότι οι υψηλές ταχύτητες καταλαμβάνουν μικρό ποσοστό σχετικά με συνολική διάρκεια πλεύσης. [38]



**Εικόνα 6.14** Διάταξη ενός συστήματος πρόωσης CONAG. [38]

#### 6.4.5 Σύστημα πρόωσης CONAS

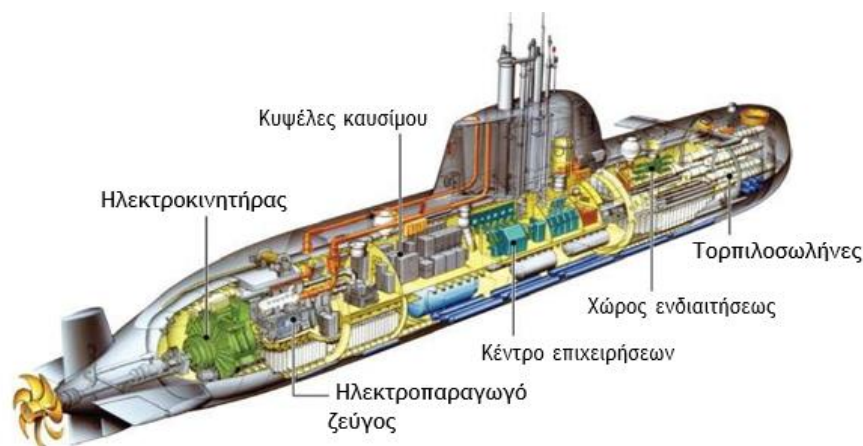
Το σύστημα CONAS (Combined Nuclear And Steam) χρησιμοποιεί έναν πυρηνικό αντιδραστήρα με σκοπό την επίτευξη χαμηλών ταχυτήτων πλεύσης, ενώ στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων επιτυγχάνεται μέσω παροχής ατμού στον ατμοστρόβιλο από λέβητα καυσίμου. Το παραπάνω σύστημα έχει εφαρμοστεί στη Ρωσική κλάση καταδρομικών κατευθυνόμενων βλημάτων Kiron. Στην περίπτωση των παραπάνω πλοίων, ως προληπτική ασφάλεια για τυχόν βλάβη στον πυρηνικό αντιδραστήρα υπάρχουν επιπλέον δύο λέβητες καυσίμου. [38]



**Εικόνα 6.15** Καταδρομικό κλάσης Κίρον. [51]

#### 6.4.6 Συνδυασμός πετρελαιοκινητήρων & κυψέλων καυσίμου

Ένα σύστημα πρόωσης που έχει εφαρμοστεί κυρίως στα υποβρύχια, είναι το σύστημα που αποτελείται από το συνδυασμό κυψέλων καυσίμου και πετρελαιοκινητήρων. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν διατάξεις άμεσης παραγωγής ενέργειας μέσω αντίδρασης του καυσίμου με οξειδωτικό, παρέχοντας έτσι υψηλό βαθμό απόδοσης. Στην περίπτωση που το υποβρύχιο πλέει στην επιφάνεια η κίνηση παρέχεται από τους πετρελαιοκινητήρες οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με γεννήτριες και παράγουν ρεύμα. Το παραγόμενο ρεύμα προφανώς προορίζεται για την κίνηση των προπελών αλλά και για την φόρτιση των συσσωρευτών. Βέβαια, στην περίπτωση που το υποβρύχιο κινείται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, η απαιτούμενη ενέργεια παρέχεται από τις κυψέλες καυσίμου. Ένα πλεονέκτημα αυτών, είναι μεγάλη αυτονομία που προσφέρουν συγκριτικά με τους συσσωρευτές αλλά και ο υψηλός βαθμός απόδοσης κατά την διαδικασία της παραγόμενης ενέργειας. Μειονέκτημα είναι σημαντικό υψηλό κόστος της εγκατάστασης, συγκριτικά με τους πετρελαιοκινητήρες ίδιας παροχής ισχύος. Ωστόσο τα συστήματα παρόλο το υψηλό κόστος παρουσιάζουν πρόοδο λόγω έλλειψη εκπομπών ρύπων και του υψηλού βαθμού απόδοσης. [38]



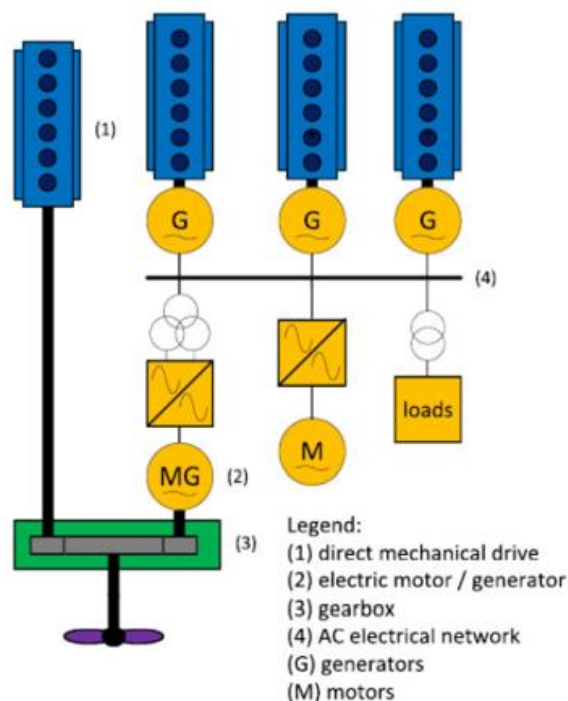
**Εικόνα 6.16** Διάταξη ενός υποβρυχίου με βασικά υποσυστήματα ενός συστήματος πρόωσης με κυψέλες καυσίμου. [38]

## 6.5 Υβριδική πρόωση

Η υβριδική πρόωση σε ένα πλοίο αναφέρεται στη χρήση συνδυασμού διαφορετικών πηγών ενέργειας για την πρόωση του πλοίου. Ο συνδυασμός αφορά συνήθως μηχανές εσωτερικής καύσης, όπως πετρελαιοκινητήρες, με βιώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλεκτρική ενέργεια, μπαταρίες ή καύσιμα κυψελών υδρογόνου.

Με την υβριδική πρόωση, το πλοίο μπορεί να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας την πιο αποδοτική πηγή ενέργειας για κάθε κατάσταση λειτουργίας. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια χαμηλών ταχυτήτων το πλοίο μπορεί να λειτουργεί με την ηλεκτρική ενέργεια από μπαταρίες ή από γεννήτριες που τροφοδοτούνται ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη. Όταν απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς, όπως κατά τη διάρκεια της πλοήγησης σε ανοιχτά νερά, οι μηχανές εσωτερικής καύσης μπορούν να ενεργοποιηθούν για παροχή επιπλέον ισχύος.

Η υβριδική πρόωση στα πλοία έχει το πλεονέκτημα της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων, των εκπομπών ρύπων και του θορύβου, καθώς επίσης και της βελτίωσης της απόδοσης του κινητήρα. Επίσης, επιτρέπει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προωθώντας την προστασία του περιβάλλοντος και την επίτευξη πιο βιώσιμων λύσεων για την ναυτιλία.



**Εικόνα 6.17** Τυπικό υβριδικό σύστημα πρόωσης. [30]

Επειδή η υβριδική πρόωση είναι ένας συνδυασμός ηλεκτρικής και μηχανικής πρόωσης, μπορεί να επωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα και των δύο. Ωστόσο, για να επιτευχθούν αυτά τα οφέλη, απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός (της υβριδικής πρόωσης) και συχνά πρέπει να γίνει αμοιβαία ανταλλαγή (trade-off) μεταξύ αυτών των απαιτήσεων. Η στρατηγική ελέγχου επιτρέπει τη βέλτιστη ανταλλαγή και μπορεί να χρησιμοποιήσει τον επιπλέον βαθμό ελέγχου μεταφέροντας ηλεκτρική ισχύ

από την μηχανική οδήγηση στο ηλεκτρικό δίκτυο και αντίστροφα. Η κύρια πρόκληση για τον σχεδιασμό υβριδικής πρόωσης είναι η εξισορρόπηση της ανταλλαγής μεταξύ όλων των απαιτήσεων και ο σχεδιασμός μιας στρατηγικής ελέγχου για την επίτευξη αυτής της ισορροπίας.

Οι τυπικές εφαρμογές υβριδικών συστημάτων ισχύος και πρόωσης είναι ναυτικές φρεγάτες και αντιτορπιλικά, ρυμουλκά πλοία και εμπορικά πλοία. Υπάρχουν οικονομικά οφέλη με την χρήση ενός υβριδικού συστήματος πρόωσης της τάξης DDG-51 του Πολεμικού Ναυτικού των Η.Π.Α. Το Πολεμικό Ναυτικό των Η.Π.Α. χρησιμοποιεί αεριοστρόβιλους ως τους κύριους κινητήρες του ακόμη και για τις γεννήτριες των υπηρεσιών των πλοίων. Βέβαια η κατανάλωση καυσίμου των αεριοστρόβιλων σε μερικό φορτίο είναι πολύ χειρότερη από αυτή των κινητήρων diesel. Έτσι η υβριδική πρόωση σε συστήματα αεριοστρόβιλων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου. [27]



**Εικόνα 6.18** Φρεγάτα τάξης DDG-51. [52]

Η χρήση υβριδικής πρόωσης προσφέρει οικονομικό όφελος για ένα σκάφος ρυμούλκησης έκτακτης ανάγκης, λαμβάνοντας υπόψη το προφίλ λειτουργίας του σκάφους. Η ισχύς του κινητήρα λειτουργεί στο 20% από τον προκαθορισμένο χρόνο λειτουργίας του. Η πιο οικονομική επιλογή για το συγκεκριμένο προφίλ λειτουργίας είναι η υβριδική πρόωση, χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο και έναν μικρό κινητήρα σε κάθε άξονα. Με αυτόν τον τρόπο, το σκάφος μπορεί αποδοτικά να διατηρεί μεσαίες ταχύτητες πορείας, ενώ χρησιμοποιεί ηλεκτρική πρόωση για χαμηλές ταχύτητες. [28]

Μελέτες δείχνουν ότι ο χρόνος λειτουργίας σε μεγάλες αποστάσεις σε συνδυασμό με αυστηρές απαιτήσεις διαθεσιμότητας για λειτουργίες DP (dynamically positioned), δηλαδή σε συνθήκες που απαιτείται η διατήρηση της θέσης χωρίς την ανάγκη χρήσης προπέλας, ταιριάζουν πολύ καλά με την υβριδική πρόωση. Η μονάδα μηχανικής πρόωσης χρησιμοποιείται για την κύρια λειτουργία σε μεγάλες αποστάσεις και η ηλεκτρική μονάδα για λειτουργία DP με υψηλή διαθεσιμότητα. Έτσι, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων άνω του 10%. Τα αποτελέσματα από αυτές τις μελέτες υποστηρίζουν ότι η υβριδική πρόωση είναι συνήθως οικονομική όταν το προφίλ λειτουργίας έχει διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας με σημαντικό χρονικό διάστημα υπό χαμηλή ισχύ. Ομοίως, έχει διαπιστωθεί ότι η υβριδική πρόωση παρέχει οικονομικά οφέλη εάν το σκάφος ταξιδεύει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα με κάτω από το 15% της προωστικής ισχύος, που ισοδυναμεί με το 40% της μέγιστης ταχύτητάς του.

Οι τρέχουσες στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζονται στην πράξη βασίζονται σε δύο τρόπους λειτουργίας: μηχανική πρόωση και ηλεκτρική πρόωση. Κατά την λειτουργία μόνο της μηχανικής πρόωσης, η ηλεκτρική μηχανή μπορεί να απενεργοποιηθεί, να χρησιμοποιηθεί ως βοηθητικός ηλεκτροκινητήρας ή να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια παίρνοντας ισχύ από την άτρακτο. Ωστόσο, πολύ λίγες εφαρμογές χρησιμοποιούν τον ηλεκτρικό κινητήρα παράλληλα με τη μηχανική πρόωση.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει ως αξονική γεννήτρια εάν ο κύριος κινητήρας έχει επαρκές περιθώριο φορτίου. Στην ιταλική ναυτική φρεγάτα (FREMM), η μηχανή που περιστρέφει την άτρακτο είναι ένας κινητήρας αεριοστροβίλου με ελεύθερο στρόβιλο ισχύος. Λόγω του ελεύθερου στρόβιλου ισχύος, η μέγιστη ισχύς του κινητήρα είναι διαθέσιμη σε οποιαδήποτε ταχύτητα. Επομένως, υπάρχει επαρκές περιθώριο φορτίου, εκτός εάν το πλοίο ταξιδεύει με μέγιστη ταχύτητα. Έτσι, η εφαρμογή του ηλεκτροκινητήρα ως αξονική γεννήτρια είναι εφικτή για αυτήν τη διαμόρφωση.

Η στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζεται στον μετατροπέα της γεννήτριας που συνδέεται με τον άξονα, είναι ο έλεγχος ταχύτητας και στατισμού (voltage drop) για την μονάδα παραγωγής ενέργειας του μετατροπέα ισχύος (inverter). Επιπλέον, ο έλεγχος πεδίου (field-oriented control-FOC) χρησιμοποιείται στην ηλεκτρική μηχανή του μετατροπέα. Αυτός ο έλεγχος ρυθμίζει το ρεύμα που παρέχεται από την πλευρά του συστήματος ισχύος του μετατροπέα, με στόχο τη διατήρηση της DC τάσης. Αυτές οι στρατηγικές σε συνδυασμό λειτουργούν αποδοτικά στη λειτουργία μιας γεννήτριας άξονα και μιας γεννήτριας diesel. Ωστόσο, λόγω της χρήσης ελέγχου ταχύτητας και στατισμού τάσης, το δυναμικό φορτίο μοιράζεται εξίσου μεταξύ της γεννήτριας άξονα και της γεννήτριας diesel. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη μη βέλτιστη χρήση της διαθέσιμης ισχύος του αεριοστροβίλου, καθώς η τελευταία μπορεί να χειριστεί δυναμικά φορτία πιο εύκολα από τη γεννήτρια diesel. Εναλλακτικά, η λειτουργία της γεννήτριας diesel με έλεγχο ταχύτητας και στατισμού και της αξονικής γεννήτριας σε ισόχρονο έλεγχο θα ανάγκαζε τον αεριοστρόβιλο να χειριστεί όλο το δυναμικό φορτίο. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να καθοριστεί εάν αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια σταθερή στρατηγική ελέγχου. [29]

Όταν η ηλεκτρική πρόωση έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί παράλληλα με την μηχανική πρόωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την μέγιστη ταχύτητα του πλοίου και να μειώσει το θερμικό φορτίο της μηχανής, και συνεπώς τις εκπομπές NO<sub>x</sub> (οξειδία του αζώτου). Ωστόσο, προτείνεται μια στρατηγική ελέγχου που εκμεταλλεύεται τη ροπή του ηλεκτροκινητήρα για τη μείωση του λόγου περίσσειας αέρα λ στην κύρια μηχανή. Ο λόγος περίσσειας αέρα λ δηλώνει την ποσότητα αέρα που είναι διαθέσιμη στον κύλινδρο της μηχανής κατά την καύση, και ως εκ τούτου αποτελεί μέτρο του θερμικού φορτίου της μηχανής.

Σύμφωνα με μελέτη, κατά τη διάρκεια ενός ελιγμού επιτάχυνσης η προτεινόμενη στρατηγική επιτυγχάνει μείωση 16% στις εκπομπές NO<sub>x</sub> και αύξηση 0.25 στον ελάχιστο λόγο περίσσειας αέρα λ από 1.85 σε 2.15, μειώνοντας έτσι σημαντικά το θερμικό φορτίο της μηχανής κατά τη διάρκεια των ελιγμών επιτάχυνσης.

Επομένως, η προτεινόμενη στρατηγική αποδεικνύει με σαφήνεια τη δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης όταν ο ηλεκτροκινητήρας χρησιμοποιείται παράλληλα με τον κύριο πετρελαιοκινητήρα [31]

### **6.5.1 Υβριδική πρόωση με συστήματα τύπου CODLAD & CODLOD**

Σε όλα τα υβριδικά συστήματα πρόωσης γίνεται συνδυασμός της μηχανικής και ηλεκτρικής μεταφοράς ισχύος προς τους προπελοφόρους άξονες. Οι πετρελαιοκινητήρες παρέχουν την μηχανική ισχύ ενώ η ηλεκτρική παρέχεται από ηλεκτροκινητήρες οι οποίοι λαμβάνουν την παραγόμενη ισχύ από ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη. Τα υβριδικά συστήματα προσφέρουν περισσότερες επιλογές κατά την διάρκεια μεταβολών της λειτουργίας ενός πλοίου σχετικά με τις ταχύτητες πλεύσης. Στο σύστημα CODLAD (Combined Diesel eLectric And Diesel) ο πετρελαιοκινητήρας λειτουργεί παράλληλα με τον ηλεκτροκινητήρα παρέχοντας ισχύ στον άξονα της προπέλας. Αντίθετα στο σύστημα CODLOD (Combined Diesel eLectric Or Diesel) η απαιτούμενη ισχύς παρέχεται είτε από την λειτουργία του πετρελαιοκινητήρα είτε του ηλεκτροκινητήρα.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι τα παρακάτω:

- Ευελιξία στην επιλογή πρόωσης, με κριτήριο την ταχύτητα πλεύσης (χαμηλές ή υψηλές ταχύτητες) επιλέγεται πάντα η κατάλληλη μορφή πρόωσης.
- Υψηλή αξιοπιστία στο σύστημα πρόωσης, καθώς η προπέλα έχει την δυνατότητα να κινείται μέσω μηχανικής ή ηλεκτρικής μεταφοράς ισχύος.
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας, καθώς δίνεται η δυνατότητα της βέλτιστης επιλογής πρόωσης σε κάθε κατάσταση λειτουργίας του πλοίου, με αποτέλεσμα οι δύο κινητήρες να λειτουργούν πάντα στο βέλτιστο εύρος λειτουργίας τους.
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων για μεγάλο εύρος φορτίων και διαφορετικά είδη πρόωσης.
- Μειωμένος χρόνος λειτουργίας των κινητήρων εκτός της βέλτιστης περιοχής λειτουργίας τους.
- Μειωμένος θόρυβος λειτουργίας χάρις την χρήση ηλεκτροκινητήρων.
- Εξαιτίας την μειωμένης λειτουργίας των πετρελαιοκινητήρων σε υψηλά φορτία, μειώνονται και οι απαιτήσεις συντήρησής τους.
- Παροχή ευελιξίας στον σχεδιασμό της εγκατάστασης, καθώς οι ανάγκες του πλοίου για ηλεκτρικό ρεύμα μπορούν να καλυφθούν μέσω των ηλεκτροκινητήρων.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συνδυαστικά συστήματα ναυτικής πρόωσης αναπτύσσονται διαρκώς καθώς η ναυτιλία και η ανάγκη για βελτιστοποίηση της απόδοσης των πλοίων συνεχίζει να αυξάνεται. Μερικές από τις μελλοντικές εξελίξεις που μπορούμε να περιμένουμε είναι οι εξής:

1. Χρήση πιο προηγμένων καυσίμων: Πιο αποδοτικά και καθαρά καύσιμα θα αντικαταστήσουν σταδιακά τα παραδοσιακά καύσιμα όπως το πετρέλαιο.
2. Ηλεκτρική και υβριδική πρόωση: Πλοία με ηλεκτρικά και υβριδικά συστήματα πρόωσης θα αυξηθούν περαιτέρω, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και βελτιστοποιώντας την ενεργειακή απόδοση.
3. Συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας: Η χρήση ηλιακών πάνελ, ανεμογεννητριών και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα πλοία θα επεκταθεί, βοηθώντας στη μείωση της εξάρτησης από τα παραδοσιακά καύσιμα.
4. Εξελίξεις στην τεχνολογία μπαταριών: Πιο προηγμένες μπαταρίες με μεγαλύτερη αποθήκευση ενέργειας και υψηλότερη απόδοση θα καθιστούν τις ηλεκτρικές προτάσεις ακόμα πιο εφικτές και αποδοτικές.
5. Εξυπνότερα συστήματα διαχείρισης ενέργειας: Προηγμένα λογισμικά και αισθητήρες θα βοηθήσουν στον καλύτερο συντονισμό των συστημάτων πρόωσης, εξοικονομώντας ενέργεια και βελτιστοποιώντας την απόδοση.
6. Ανάπτυξη υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG): Το LNG θα συνεχίσει να είναι μια εναλλακτική λύση καυσίμου που προσφέρει λιγότερες εκπομπές από τα παραδοσιακά καύσιμα.

Όλες αυτές οι εξελίξεις έχουν στόχο να μειώσουν την αρνητική επίπτωση της ναυτιλιακής βιομηχανίας στο περιβάλλον, προωθώντας πιο βιώσιμες λύσεις για την πλεύση στη θάλασσα. Οι τεχνολογικές αυτές πρόοδοι είναι κρίσιμες για την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων και την αειφόρο ανάπτυξη του κλάδου της ναυτιλίας.



## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Pietrzykowski, Z. (2001). The analysis of a ship fuzzy domain in a restricted area. *IFAC Proceedings Volumes*, 34(7), 45-50.
2. Diesel, M. A. N. (2011). Turbo. *Basic Principles of Ship Propulsion*, "MAN Diesel & Turbo, Copenhagen.
3. Jonsson, Å. M., Westerlund, J., & Hallquist, M. (2011). Size-resolved particle emission factors for individual ships. *Geophysical Research Letters*, 38(13).
4. Kak, V. (2016). Infections on Cruise Ships. *Infections of Leisure*, 345-353.
5. Wielgosz, M., & Pietrzykowski, Z. (2012). Ship domain in the restricted area—analysis of the influence of ship speed on the shape and size of the domain. *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*, 138-142.
6. Sys, C., Blauwens, G., Omeij, E., Van De Voorde, E., & Witlox, F. (2008). In search of the link between ship size and operations. *Transportation Planning and Technology*, 31(4), 435-463.
7. Hsu, C. I., & Hsieh, Y. P. (2007). Routing, ship size, and sailing frequency decision-making for a maritime hub-and-spoke container network. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 899-916.
8. Mallam, S. C., Lundh, M., & MacKinnon, S. N. (2015). Integrating human factors & ergonomics in large-scale engineering projects: investigating a practical approach for ship design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 50, 62-72.
9. Internal combustion engines volume 2 2008, published by Institute Eugenidou (pages 99-103)
10. Ghose, J.P., & Gokarn R.P. (2004). *Basic Ship Propulsion*. New Dehli: Allied Publisher.
11. Bissell, C. (2009). A History of Automatic Control.
12. Jan Fredrik Hansen & Frank Wendt (2015). History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends.
13. Norbert Doerry, John Amy, Cy Krolick (2015). History and the Status of Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends in the U.S. Navy
14. Poul Andersen, Anne-Sophie Borrod, Hervé Blanchot (2005). Evaluation of the Service Performance of Ships.
15. Richa Agarwal, Özlem Ergun (2010). Network Design and Allocation Mechanisms for Carrier Alliances in Liner Shipping
16. Atilla Incecik (2022). Ocean Engineering. An international journal of research and development, Vol 266P5

17. Kozłowska, A. M., & Steen, S. (2017). Experimental analysis on the risk of vortex ventilation and the free surface ventilation of marine propellers. *Applied Ocean Research*, 67, 201-212.
18. Mirjalili, S., Lewis, A., & Mirjalili, S. A. M. (2015). Multi-objective optimisation of marine propellers. *Procedia Computer Science*, 51, 2247-2256.
19. Suzuki, T., & Nakamura, D. (2011). U.S. Patent No. 8,066,539. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
20. Lee, J. U., Jeong, B., & An, T. H. (2019). Investigation on effective support point of single stern tube bearing for marine propulsion shaft alignment. *Marine Structures*, 64, 1-17.
21. Matheus, J., Ignova, M., & Hornblower, P. (2014, May). A hybrid approach to closed-loop directional drilling control using rotary steerable systems. In *SPE Latin America and Caribbean*
22. Xin, B., Xiaohui, L., Zhaocun, S., & Yuquan, Z. (2013). A vectored water jet propulsion method for autonomous underwater vehicles. *Ocean engineering*, 74, 133-140.
23. Rutkowski, G. (2016). Study of Green Shipping Technologies-Harnessing Wind, Waves and Solar Power in New Generation Marine Propulsion Systems. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(4), 627-632.
24. Swider-Lyons, K., Stroman, R., Page, G., Schuette, M., Mackrell, J., & Rodgers, J. (2011). Hydrogen Fuel Cell Propulsion for Long Endurance Small UVAs. In *AIAA Centennial of Naval Aviation Forum" 100 Years of Achievement and Progress"* (p. 6975).
25. Gong, A., & Verstraete, D. (2017). Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 21311-21333.
26. Chan, C. S., Cheng, J. H., Zeng, C. H., Huang, J. R., Chen, Y. H., Chen, Y. J., ... & Pan, K. C. (2020). Design of marine vehicle powered by magnetohydrodynamic thruster. *MAGNETOHYDRODYNAMICS*, 56(1), 51-65.
27. Castles, G., Bendre, A. (2009, April). Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships. In *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium* (pp. 515-520). IEEE.
28. Sulligoi, G., Castellan, S., Aizza, M., Bosich, D., Piva, L., & Lipardi, G. (2012, June). Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation. In *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion* (pp. 452-457). IEEE.
29. Wijsmuller, M., & Hasselaar, T. (2007). Optimisation of the propulsion arrangement in emergency towing vessels. *Ship and boat international*, 34-7

30. Rinze Geertsma,R.R. Negenborn,K. Visser,Hans (J.J.) Hopman (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships
31. Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. Journal of Power Sources, 327, 345-364.
32. Intro to ship's stem engine, (<https://martinsmarineengineeringuk.wordpress.com/>)
33. Global Marine Services Co.Ltd. (<https://www.globemarineservices.com/>)
34. Steam turbine parts, <https://www.mechstudies.com/>)
35. Zvyagintseva, Sazonova, Kulneva (2020). Development of engineering and technical environmental measures for technogenic atmospheric pollution by thermal power facilities
36. Nuclear population, (<https://man.fas.org>)
37. Mitsubishi Heavy Industries Ltd (<https://www.mhi.com/>)
38. Internal combustion engines volume 2 2018, published by Institute Eugenidou (pages 376-392)
39. [https://en.wikipedia.org/wiki/RMS\\_Queen\\_Mary](https://en.wikipedia.org/wiki/RMS_Queen_Mary)
40. [https://en.wikipedia.org/wiki/Queen\\_Mary\\_2](https://en.wikipedia.org/wiki/Queen_Mary_2)
41. [https://en.wikipedia.org/wiki/Spanish\\_amphibious\\_assault\\_ship\\_Juan\\_Carlos\\_I](https://en.wikipedia.org/wiki/Spanish_amphibious_assault_ship_Juan_Carlos_I)
42. [https://en.wikipedia.org/wiki/Arleigh\\_Burke-class\\_destroyer](https://en.wikipedia.org/wiki/Arleigh_Burke-class_destroyer)
43. <https://www.marineinsight.com/boating-yachting/what-are-hydrofoil-boats/>
44. <https://www.designboom.com/technology/planetsolar-the-first-solar-powered-boat-around-the-world/>
45. [https://en.wikipedia.org/wiki/Marine\\_steam\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Marine_steam_engine)
46. [https://www.michellbearings.com/video\\_animation/propeller-shaft-bearing-and-thrust-block/](https://www.michellbearings.com/video_animation/propeller-shaft-bearing-and-thrust-block/)
47. <https://skysails-marine.com/>
48. [https://en.wikipedia.org/wiki/Combined\\_gas\\_or\\_gas](https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_gas_or_gas)
49. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:COGES-diagram.png>
50. [https://en.wikipedia.org/wiki/Combined\\_steam\\_and\\_gas](https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_steam_and_gas)
51. [https://en.wikipedia.org/wiki/Kirov-class\\_battlecruiser](https://en.wikipedia.org/wiki/Kirov-class_battlecruiser)
52. [https://en.wikipedia.org/wiki/Arleigh\\_Burke-class\\_destroyer](https://en.wikipedia.org/wiki/Arleigh_Burke-class_destroyer)