



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ **ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

Διπλωματική Εργασία

«ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΩΣΗΣ ΚΑΙ **ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΠΛΟΙΑ:** **ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ** **ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ»**

της

Αικατερίνης Πελέκη

Επιβλέπων:

Θεόδωρος Ζάννης

Πειραιάς

Απρίλιος 2026

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

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

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: Θεόδωρος Ζάννης

ΜΕΛΟΣ Β΄: Ιωάννης Κατσάνης

ΜΕΛΟΣ Γ΄: Ευθύμιος Παριώτης

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές μου, Δρ. Ιωάννη Σ. Κατσάνη και κ. Θεόδωρο Ζάννη, οι οποίοι με την επιστημονική τους κατάρτιση και τις καίριες υποδείξεις τους με βοήθησαν να φέρω εις πέρας αυτή τη μελέτη. Ευχαριστώ επίσης όλους τους καθηγητές του Δι-ιδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία» για το υψηλό επίπεδο σπουδών που μου προσέφεραν, καθώς και τους συναδέλφους μεταπτυχιακούς φοιτητές για το πνεύμα συνεργασίας που αναπτύξαμε την περίοδο φοίτησης μας.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

- 1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας
- 1.2 Μεθοδολογία Προσέγγισης
 - 1.2.1 Στρατηγική Αναζήτησης και Συλλογής Δεδομένων
 - 1.2.2 Πλαίσιο Συγκριτικής Αξιολόγησης
 - 1.2.3 Κατηγοριοποίηση και Επιλογή Περιπτώσεων Εφαρμογής
- 1.3 Ιστορικό και Σύγχρονες Τάσεις στη Ναυτιλία
- 1.4 Δομή της Εργασίας

Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό Υπόβαθρο και Νομοθεσία στη Ναυτιλία

- 2.1 Ενεργειακή Κατανάλωση και Αποδοτικότητα στα Πλοία
- 2.2 Η Περιβαλλοντική Επίπτωση της Ναυτιλίας
- 2.3 Το Νομοθετικό Πλαίσιο του IMO για την Ενεργειακή Απόδοση
 - 2.3.1 Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης - Energy Efficiency Design Index (EEDI)
 - 2.3.2 Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υφισταμένων Πλοίων - Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)
 - 2.3.3 Δείκτης Έντασης Άνθρακα - Carbon Intensity Indicator (CII)
 - 2.3.4 Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου - Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)
- 2.4 Τεχνολογικές Κατευθύνσεις για τη Μείωση Εκπομπών
 - 2.4.1 Εναλλακτικά Καύσιμα
 - 2.4.2 Ανάκτηση Απορριπτόμενης Θερμότητας και Βέλτιστη Διαχείριση Ενέργειας
 - 2.4.3 Ηλεκτρική και Υβριδική Πρόωση
 - 2.4.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στη Ναυτιλία
- 2.5 Ο Ρόλος των Υβριδικών Συστημάτων στο Πλαίσιο της Νομοθεσίας

Κεφάλαιο 3 - Υβριδικά Συστήματα Πρόωσης και Ενέργειας – Τεχνολογική Επισκόπηση

- 3.1 Ορισμός και Αρχή Λειτουργίας των Υβριδικών Συστημάτων
- 3.2 Κατηγορίες Υβριδικών Συστημάτων
 - 3.2.1 Σειριακά Υβριδικά Συστήματα
 - 3.2.2 Παράλληλα Υβριδικά Συστήματα
 - 3.2.3 Σειριακά–Παράλληλα Υβριδικά Συστήματα
- 3.3 Βασικά Στοιχεία και Τεχνολογίες Υποστήριξης
 - 3.3.1 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems – ESS)
 - 3.3.2 Ηλεκτρικές Μηχανές και Ηλεκτρονικά Ισχύος
 - 3.3.3 Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας
- 3.4 Παραδείγματα Εφαρμογών στη Διεθνή Ναυτιλία

Κεφάλαιο 4 - Ανάλυση Πλεονεκτημάτων και Μειονεκτημάτων Υβριδικών Συστημάτων Πρόωσης και Ενέργειας

- 4.1 Τεχνική Αξιολόγηση
- 4.2 Περιβαλλοντική Αξιολόγηση
 - 4.2.1 Μείωση Αέριων Ρύπων και Σωματιδίων
 - 4.2.2 Ποσοτική Ανάλυση Εκπομπών
- 4.3 Οικονομική Ανάλυση και Βιωσιμότητα της Επένδυσης
 - 4.3.1 Ανάλυση Λειτουργικού Κόστους (OPEX) και Εξοικονόμηση
 - 4.3.2 Η Επίδραση του EU ETS και του Carbon Pricing
 - 4.3.3 Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period) και ROI
 - 4.3.4 Ποσοτική Ανάλυση Οφέλους και Τεκμηρίωση Δεδομένων
- 4.4 Προβλήματα και Προκλήσεις
 - 4.4.1 Ασφάλεια και Θερμική Ευστάθεια
 - 4.4.2 Κανονιστικό Πλαίσιο και Πιστοποίηση
 - 4.4.3 Ανθρώπινος Παράγοντας και Συντήρηση

Κεφάλαιο 5 - Επιλογή Βέλτιστων Συστημάτων Υβριδικών Συστημάτων Ανά Τύπο Πλοίου

- **5.1 Κριτήρια Επιλογής και Πολυκριτηριακή Ανάλυση**
- **5.1.1 Λειτουργικό Προφίλ (Operational Profile)**
- **5.1.2 Τεχνική Εφικτότητα και Χωροθέτηση**
- **5.1.3 Κανονιστική Συμμόρφωση (EEXI/CII)**
- **5.1.4 Οικονομικό Κόστος Κύκλου Ζωής (LCC)**
- **5.2 Ανάλυση Ανά Τύπο Πλοίου**
- **5.2.1 Επιβατηγά Πλοία και Ακτοπλοϊκά Ferries**
- **5.2.2 Πλοία Υποστήριξης Υπεράκτιων Εγκαταστάσεων (OSVs)**
- **5.2.3 Ρυμουλκά και Πλοία Λιμενικών Εργασιών**
- **5.2.4 Εμπορικά Πλοία Μεγάλων Αποστάσεων**
- **5.3 Προτάσεις Βέλτιστων Λύσεων και Μελλοντικές Τάσεις**

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

- **6.1 Συνοπτικά Συμπεράσματα της Μελέτης**
- **6.2 Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις**
- **6.3 Προτάσεις για την Ελληνική Ναυτιλία**

Σχήματα

Σχήμα 1: Hybrid drive designed in series, <https://www.baumueller.com>

Σχήμα 2: Διάταξη παράλληλου υβριδικού συστήματος πρόωσης πλοίου, <https://seapower.com>

Σχήμα 3: Διάταξη υβριδικού συστήματος πρόωσης πλοίου με ηλεκτρομηχανή άξονα (PTO/PTI) και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Σχήμα 4: MF Ampere, <https://corvusenergy.com>

Σχήμα 5: Viking Lady, <https://eidesvik.no/vessels/viking-lady>

Σχήμα 6: Διάταξη υβριδικού συστήματος πρόωσης με λειτουργίες PTO και PTI. Chin et al.(2022)

Σχήμα 7: Liu, W., Xu, B., & Li, J. (2025). Ανάλυση της δυναμικής των εκπομπών άνθρακα βάσει δεδομένων υπό συνθήκες συμφόρησης πλοίων σε λιμένες. Journal of Marine Science and Engineering, 13(4), 812.

Πίνακες

Πίνακας 1: Συγκριτική Τεχνική Αξιολόγηση Συστημάτων

Πίνακας 2: Τεχνική Σύγκριση Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος βάσει Βιβλιογραφικών Δεδομένων

Πίνακας 3: Συγκριτική Οικονομική Αξιολόγηση Συμβατικών και Υβριδικών Συστημάτων Πρόωσης

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας στα πλοία ως μία από τις πλέον ρεαλιστικές και υποσχόμενες τεχνολογικές λύσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών ρύπων στη ναυτιλία. Το ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες αυτές ενισχύεται από τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές απαιτήσεις και από το διεθνές κανονιστικό πλαίσιο του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), το οποίο περιλαμβάνει δείκτες και μέτρα όπως οι EEDI, EEXI, CII και SEEMP. Η εργασία διερευνά τον ρόλο των υβριδικών συστημάτων στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης της ναυτιλίας και αναλύει τη συμβολή τους στη συμμόρφωση με τις σύγχρονες απαιτήσεις απανθρακοποίησης.

Μεθοδολογικά, η μελέτη βασίζεται σε δευτερογενή ποιοτική έρευνα και συγκριτική τεχνική αξιολόγηση, μέσω συστηματικής ανασκόπησης της διεθνούς βιβλιογραφίας, κανονιστικών κειμένων του IMO, τεχνικών προδιαγραφών νηογνωμόνων και επιλεγμένων περιπτώσεων εφαρμογής. Η αξιολόγηση των τεχνολογικών λύσεων πραγματοποιείται με βάση τέσσερις κύριους άξονες: την τεχνική ωριμότητα, την περιβαλλοντική αποδοτικότητα, την οικονομική βιωσιμότητα και την κανονιστική συμμόρφωση. Παράλληλα, η ανάλυση εξειδικεύεται ανά τύπο πλοίου, ώστε να αναδειχθούν οι διαφορετικές απαιτήσεις και οι δυνατότητες εφαρμογής των υβριδικών τεχνολογιών σε διαφορετικά επιχειρησιακά προφίλ.

Τα ευρήματα της εργασίας δείχνουν ότι τα υβριδικά συστήματα μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, στον περιορισμό των εκπομπών CO₂, SO_x και NO_x και στη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης των πλοίων, ιδίως σε κατηγορίες όπως τα επιβατηγά πλοία, τα ferries, τα ρυμουλκά και τα πλοία υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων. Αντίθετα, στην ποντοπόρο ναυτιλία η εφαρμογή τους εμφανίζει μεγαλύτερες τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις, λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων και των περιορισμών των σημερινών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Συμπερασματικά, τα υβριδικά συστήματα δεν αποτελούν καθολική λύση για όλα τα πλοία, συνιστούν όμως κρίσιμη μεταβατική τεχνολογία προς τη ναυτιλία χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών, προσφέροντας σημαντικά

πλεονεκτήματα ευελιξίας, ενεργειακής διαχείρισης και μελλοντικής προσαρμοστικότητας.

Λέξεις-κλειδιά: υβριδικά συστήματα πρόωσης, ναυτιλία, ενεργειακή απόδοση, IMO, EEXI, CII, απανθρακοποίηση, εναλλακτικά καύσιμα.

Abstract

This thesis examines hybrid propulsion and energy systems in ships as one of the most realistic and promising technological solutions for improving energy efficiency and reducing atmospheric emissions in the maritime sector. Interest in these technologies has grown significantly due to stricter environmental requirements and the international regulatory framework established by the International Maritime Organization (IMO), including measures and indices such as EEDI, EEXI, CII, and SEEMP. The study investigates the role of hybrid systems within the broader energy transition of shipping and analyzes their contribution to compliance with current decarbonization targets.

Methodologically, the study is based on secondary qualitative research and comparative technical assessment through a systematic review of the international literature, IMO regulatory documents, classification society technical requirements, and selected case studies. The technological solutions are evaluated according to four main criteria: technical maturity, environmental performance, economic viability, and regulatory compliance. In addition, the analysis is differentiated by ship type in order to highlight the varying operational requirements and the applicability of hybrid technologies across different vessel categories.

The findings indicate that hybrid systems can substantially contribute to fuel savings, lower emissions of CO₂, SO_x, and NO_x, and improve the overall operational efficiency of ships, particularly in vessel categories such as passenger ships, ferries, tugboats, and offshore support vessels. In contrast, their implementation in deep-sea shipping remains more challenging due to high energy demands and the limitations of current energy storage technologies. In conclusion, hybrid propulsion systems do not constitute a universal solution for all ship types; however, they represent a crucial transitional technology toward low- and zero-emission shipping, offering significant advantages in flexibility, energy management, and future adaptability.

Keywords: hybrid propulsion systems, shipping, energy efficiency, IMO, EEXI, CII, decarbonization, alternative fuels.

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Η αυξανόμενη ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών ρύπων στη ναυτιλία έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογικών λύσεων, οι οποίες στοχεύουν στην ενίσχυση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων. Μία από τις βασικές προσεγγίσεις που υιοθετούνται τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων με χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες επιλογές, καθώς συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών θείου (SO_x) και οξειδίων του αζώτου (NO_x), ενώ παράλληλα επιτρέπει τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πετρελαίου. Παράλληλα, καύσιμα όπως η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο εξετάζονται ως μελλοντικές λύσεις χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα, ιδιαίτερα όταν παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σημαντική επίσης συμβολή στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων έχουν και οι τεχνολογίες βελτιστοποίησης της σχεδίασης και λειτουργίας τους. Στις τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνονται ο βελτιωμένος σχεδιασμός της γάστρας και της προπέλας, τα συστήματα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας από τις μηχανές, καθώς και τα ψηφιακά συστήματα διαχείρισης ενέργειας και βελτιστοποίησης της διαδρομής του πλοίου. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την πιο αποδοτική εκμετάλλευση της διαθέσιμης ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου. Οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), όπως ο Energy Efficiency Design Index (EEDI), ο Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) και ο Carbon Intensity Indicator (CII), έχουν εισάγει αυστηρές απαιτήσεις για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη σταδιακή απανθρακοποίηση του ναυτιλιακού τομέα. Σε αυτό το πλαίσιο, τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας αποτελούν μία από τις πιο ενδιαφέρουσες και υποσχόμενες τεχνολογικές επιλογές. Η υβριδική πρόωση συνδυάζει δύο ή περισσότερες πηγές ενέργειας, συνήθως έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης και ένα ηλεκτρικό σύστημα αποθήκευσης ή παραγωγής ενέργειας, με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας και τη μείωση

της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Η υιοθέτηση υβριδικών τεχνολογιών αποτελεί κεντρικό πυλώνα στη στρατηγική των ελληνικών ναυτιλιακών εταιρειών, οι οποίες καλούνται να ισορροπήσουν ανάμεσα στις αυστηρές περιβαλλοντικές απαιτήσεις και τη διατήρηση της λειτουργικής τους αποδοτικότητας στην ποντοπόρο ναυτιλία (Isalos.net, 2021).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συστηματική διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας αναφορικά με τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας που είτε έχουν ήδη αξιοποιηθεί στη ναυτιλία είτε παρουσιάζουν προοπτικές εφαρμογής σε πλοία. Ειδικότερα, η εργασία επικεντρώνεται στην καταγραφή, τη σύγκριση και την αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών με βάση τεχνικά, ενεργειακά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια. Παράλληλα, επιδιώκεται η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών που χαρακτηρίζουν κάθε τεχνολογική προσέγγιση, καθώς και η διατύπωση προτάσεων για τις καταλληλότερες λύσεις ανά κατηγορία πλοίου, με γνώμονα τόσο το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο όσο και τη βιωσιμότητα της εφαρμογής τους.

Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας συνοψίζονται στα εξής:

- Ανασκόπηση της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας για υβριδικά συστήματα στη ναυτιλία.
- Κατηγοριοποίηση των υβριδικών συστημάτων με βάση τον τύπο ενέργειας και τη λειτουργική τους αρχή.
- Αξιολόγηση της τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής απόδοσής τους.
- Εξέταση της συμμόρφωσης των τεχνολογιών αυτών με τους ισχύοντες κανονισμούς του IMO.
- Διαμόρφωση προτάσεων για την καταλληλότερη τεχνολογία ανά κατηγορία πλοίου.

1.2 Μεθοδολογία Προσέγγισης

Η παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετεί μια πολυεπίπεδη μεθοδολογική προσέγγιση, η οποία συνδυάζει τη δευτερογενή ποιοτική έρευνα με τη συγκριτική τεχνική αξιολόγηση. Η επιλογή αυτή κρίθηκε αναγκαία λόγω

της πολυπλοκότητας των υβριδικών συστημάτων, τα οποία απαιτούν ταυτόχρονη εξέταση τεχνικών προδιαγραφών, κανονιστικών απαιτήσεων και οικονομικής βιωσιμότητας.

1.2.1 Στρατηγική Αναζήτησης και Συλλογής Δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω συστηματικής αναζήτησης σε διεθνείς ακαδημαϊκές βάσεις δεδομένων (όπως ScienceDirect, IEEE Xplore, Google Scholar) και τεχνικές βιβλιοθήκες διεθνών οργανισμών. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρήση:

- **Κανονιστικών κειμένων του IMO:** Για την ανάλυση των δεικτών EEDI, EEXI και CII.
- **Τεχνικών προδιαγραφών (Type Approval) από Νηογνώμονες:** Όπως οι DNV, ABS και Lloyd's Register, για την κατανόηση των απαιτήσεων ασφαλείας των υβριδικών συστημάτων.
- **White Papers και Case Studies κορυφαίων κατασκευαστών:** Όπως η Wärtsilä, η ABB και η MAN Energy Solutions, οι οποίες παρέχουν δεδομένα από πραγματικές εφαρμογές σε πλοία.

1.2.2 Πλαίσιο Συγκριτικής Αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση των διαφορετικών τεχνολογικών λύσεων, η εργασία χρησιμοποιεί ένα πλαίσιο τεσσάρων αξόνων:

1. **Τεχνική Ωριμότητα (Technology Readiness Level - TRL):** Εξέταση του κατά πόσο μια τεχνολογία (π.χ. κυψέλες καυσίμου vs μπαταρίες λιθίου) είναι έτοιμη για ευρεία εμπορική εφαρμογή.
2. **Περιβαλλοντική Αποδοτικότητα:** Ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση της μείωσης των εκπομπών CO₂, SO_x και NO_x ανάλογα με το προφίλ λειτουργίας του πλοίου.
3. **Οικονομική Βιωσιμότητα:** Ανάλυση του κεφαλαιακού κόστους (CAPEX) και των λειτουργικών εξόδων (OPEX), λαμβάνοντας υπόψη τη δυνητική εξοικονόμηση καυσίμου.

4. **Κανονιστική Συμμόρφωση:** Έλεγχος της ικανότητας κάθε συστήματος να βοηθήσει το πλοίο να επιτύχει την απαιτούμενη βαθμολογία στον δείκτη CII.

1.2.3 Κατηγοριοποίηση και Επιλογή Περιπτώσεων Εφαρμογής

Η ανάλυση δεν παραμένει σε επίπεδο γενικής περιγραφής, αλλά προσαρμόζεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε τύπου πλοίου. Η επιλογή των επιμέρους κατηγοριών, όπως τα εμπορικά, τα επιβατηγά και τα πλοία μικρών αποστάσεων, βασίστηκε στη διαφοροποίηση των ενεργειακών απαιτήσεών τους. Ενδεικτικά, στα επιβατηγά πλοία εξετάζεται η δυνατότητα παραμονής στο λιμάνι με μηδενικές εκπομπές (Zero Emission Port Stay), ενώ στα ποντοπόρα εμπορικά πλοία το ενδιαφέρον εστιάζει στη συμβολή των υβριδικών συστημάτων στην εξομάλυνση των φορτίων αιχμής (Peak Shaving).

1.3 Ιστορικό και Σύγχρονες Τάσεις στη Ναυτιλία

Η ναυτιλία αποτελεί έναν από τους αρχαιότερους και πλέον καθοριστικούς τομείς του παγκόσμιου συστήματος μεταφορών και, διαχρονικά, στηρίχθηκε στη χρήση συμβατικών καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών που σχετίζονται με την πρόωση και τις βοηθητικές λειτουργίες των πλοίων. Κατά την ιστορική της εξέλιξη, από την ιστιοκίνηση στην ατμοκίνηση και αργότερα στις μηχανές εσωτερικής καύσης, το πετρέλαιο και τα παράγωγά του, όπως το ντίζελ και το βαρύ μαζούτ (Heavy Fuel Oil – HFO), επικράτησαν ως οι κυρίαρχες ενεργειακές πηγές στη ναυτιλιακή δραστηριότητα (Storford, 2009). Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η εκτεταμένη διαθεσιμότητα και το σχετικά χαμηλό κόστος των καυσίμων αυτών συνέβαλαν καθοριστικά στην ευρεία υιοθέτησή τους και, κατ' επέκταση, στην ενίσχυση της ανάπτυξης του παγκόσμιου εμπορίου. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, όμως, η ευρεία χρήση τους συνδέθηκε με σοβαρές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Ειδικότερα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x), οξειδίων του θείου (SO_x) και αιωρούμενων σωματιδίων (PM) από τα πλοία επηρεάζουν αρνητικά τόσο το κλίμα όσο και την ποιότητα της ατμόσφαιρας, ιδίως στις λιμενικές και παράκτιες ζώνες (Eyring et al., 2010). Παρότι η ναυτιλία θεωρείται γενικά πιο ενεργειακά αποδοτική σε σχέση με άλλους τρόπους μεταφοράς,

εξακολουθεί να συμβάλλει αισθητά στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που εντείνει τη διεθνή πίεση για τη μείωση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος.

Στο πλαίσιο αυτό, η διεθνής κοινότητα, υπό τον συντονισμό του International Maritime Organization, έχει προχωρήσει τα τελευταία χρόνια στη θέσπιση αυστηρότερων κανονισμών που αφορούν τόσο τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων όσο και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων (IMO, 2023). Οι κανονισμοί αυτοί λειτουργούν ως καταλύτης για την αναζήτηση εναλλακτικών και αποδοτικότερων τεχνολογικών λύσεων, οδηγώντας τη ναυτιλιακή βιομηχανία σε μια σταδιακή αλλά αναπόφευκτη ενεργειακή μετάβαση (Psaraftis, 2019). Παράλληλα με τις κανονιστικές εξελίξεις, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η τεχνολογική πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια σε συναφείς τομείς. Η ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης, η βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας και της αξιοπιστίας των συσσωρευτών, καθώς και η πρόοδος στις κυψέλες καυσίμου και στις τεχνολογίες αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν δημιουργήσει νέες δυνατότητες (Banaei et al., 2023) για τη διαμόρφωση πιο σύνθετων ενεργειακών συστημάτων και στον ναυτιλιακό τομέα. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν ήδη βρει εφαρμογή κυρίως σε πλοία μικρότερων αποστάσεων, όπως επιβατηγά πλοία, φέρι και πλοία υποστήριξης offshore, όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις και τα λειτουργικά προφίλ καθιστούν ευκολότερη την ενσωμάτωσή τους. Αντίθετα, στην ποντοπόρο ναυτιλία, όπου οι απαιτήσεις πρόωσης μπορεί να φθάνουν ή και να υπερβαίνουν τα 80–90 MW, η πλήρης αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων πρόωσης παραμένει προς το παρόν τεχνολογικά και επιχειρησιακά απαιτητική (Geertsma et al., 2017). Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη έρευνα και η βιομηχανική πρακτική στρέφονται σε λύσεις που συνδυάζουν συμβατικές τεχνολογίες με νέες μορφές αποθήκευσης και διαχείρισης ενέργειας, με στόχο τη σταδιακή βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και τη μείωση των εκπομπών.

Σε αυτό το τεχνολογικό και κανονιστικό πλαίσιο, τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας αναδεικνύονται ως μία από τις πλέον ρεαλιστικές λύσεις για τη μεταβατική περίοδο προς τη ναυτιλία χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών. Αρχικά, η εφαρμογή τους περιοριζόταν κυρίως σε στρατιωτικά, ερευνητικά και

ειδικών αποστολών σκάφη, όπου η ανάγκη για αθόρυβη λειτουργία, αυξημένη ευελιξία και ενεργειακή αυτονομία ήταν ιδιαίτερα έντονη. Σήμερα, όμως, παρατηρείται αυξανόμενη υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων και σε εμπορικά και επιβατηγά πλοία, ιδιαίτερα σε κατηγορίες όπως τα ακτοπλοϊκά πλοία, τα ferries και τα πλοία μικρών αποστάσεων (short sea shipping).

Καίριας σημασίας είναι επίσης η εξέλιξη των ευφυών συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Systems – EMS), τα οποία καθιστούν δυνατή τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος μεταξύ των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών (Kalikatzarakis et al., 2022). Μέσω της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τα συστήματα αυτά συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, στον περιορισμό των εκπομπών και στη βελτίωση της συνολικής λειτουργικής απόδοσης του πλοίου. Σε γενικές γραμμές, η σύγχρονη ναυτιλία διανύει μια μεταβατική περίοδο, κατά την οποία οι υβριδικές λύσεις λειτουργούν ως ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ των συμβατικών συστημάτων πρόωσης και των μελλοντικών τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Ο συνδυασμός τεχνολογικής ωριμότητας, κανονιστικών πιέσεων και οικονομικών κινήτρων καθιστά την υβριδική πρόωση μία από τις πιο ρεαλιστικές και εφαρμόσιμες επιλογές για την επόμενη δεκαετία.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η εργασία αποτελείται από έξι κύρια κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το πλαίσιο, ο σκοπός, οι στόχοι και η μεθοδολογία. Το Κεφάλαιο 2 επικεντρώνεται στο θεωρητικό υπόβαθρο, με ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων και του σχετικού νομοθετικού πλαισίου του IMO. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενής παρουσίαση των υβριδικών συστημάτων πρόωσης και ενέργειας, των αρχών λειτουργίας τους και των τεχνολογικών εφαρμογών. Το Κεφάλαιο 4 εξετάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε κατηγορίας υβριδικού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες. Στο Κεφάλαιο 5 προτείνονται βέλτιστες λύσεις ανά τύπο πλοίου, ενώ το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και τις προοπτικές μελλοντικής ανάπτυξης των υβριδικών τεχνολογιών στη ναυτιλία. Η δομή αυτή εξασφαλίζει μια λογική και συνεκτική

ροή από το θεωρητικό υπόβαθρο προς την εφαρμογή και τη σύγκριση τεχνολογιών, διευκολύνοντας την κατανόηση του θέματος και την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό Υπόβαθρο και Νομοθεσία στη Ναυτιλία

2.1 Ενεργειακή Κατανάλωση και Αποδοτικότητα στα Πλοία

Όπως είναι γνωστό η ναυτιλία αποτελεί έναν από τους βασικότερους πυλώνες του παγκόσμιου εμπορίου, καθώς μεταφέρει περίπου το 90% του όγκου των διεθνών εμπορευματικών ροών (UNCTAD, 2024). Η κυρίαρχη θέση της οφείλεται στη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων φορτίου με σχετικά χαμηλό κόστος ανά μονάδα μεταφερόμενου προϊόντος. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η ναυτιλία συγκαταλέγεται στους πλέον ενεργοβόρους τομείς των μεταφορών σε απόλυτους όρους, λόγω της μεγάλης κλίμακας των δραστηριοτήτων της και της συνεχούς αύξησης της ζήτησης για θαλάσσιες μεταφορές. Η κατανάλωση καυσίμου ενός πλοίου αποτελεί βασικό λειτουργικό και οικονομικό παράγοντα και εξαρτάται από πληθώρα μεταβλητών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται ο τύπος και το μέγεθος του πλοίου, η χωρητικότητα και το φορτίο, η ταχύτητα πλεύσης, το προφίλ λειτουργίας, οι επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες (άνεμος, κυματισμός, ρεύματα), καθώς και η τεχνική κατάσταση και απόδοση των συστημάτων πρόωσης και ενέργειας. Ιδιαίτερα η ταχύτητα πλεύσης έχει μη γραμμική επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου, καθώς η απαιτούμενη ισχύς αυξάνεται περίπου με τον κύβο της ταχύτητας

$$PB = cV^n$$

όπου P η ισχύς πέδησης, V η ταχύτητα και ο εκθέτης n κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 3 και 4 για τα περισσότερα πλοία. Γεγονός που καθιστά τη διαχείρισή της κρίσιμο εργαλείο εξοικονόμησης ενέργειας (Psaraftis & Kontovas, 2013).

Η ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου ορίζεται ως η ικανότητά του να μετατρέπει την ενέργεια του καυσίμου σε ωφέλιμη μηχανική ισχύ για την πρόωση και την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών, με τις μικρότερες δυνατές απώλειες (Woud & Stapersma, 2002). Στην πράξη, η ενεργειακή αλυσίδα ενός πλοίου περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια μετατροπής ενέργειας, στα οποία εμφανίζονται αναπόφευκτες απώλειες. Η βελτίωση της απόδοσης σε κάθε στάδιο της αλυσίδας αυτής αποτελεί βασικό στόχο της σύγχρονης ναυπηγικής και ναυτιλιακής τεχνολογίας. Τα κύρια υποσυστήματα που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου είναι, καταρχάς, η κύρια

μηχανή πρόωσης. Τα περισσότερα εμπορικά πλοία χρησιμοποιούν μεγάλες αργόστροφες δίχρονες μηχανές Diesel, οι οποίες λειτουργούν κυρίως με βαρέα καύσιμα (Heavy Fuel Oil – HFO) ή ναυτιλιακό πετρέλαιο (Marine Gas Oil – MGO). Παρά τη σχετικά υψηλή θερμική τους απόδοση, η οποία στις μέρες μας φτάνει το 55%, ένα σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του καυσίμου απορρίπτεται ως θερμότητα μέσω των καυσαερίων και του συστήματος ψύξης (Kuiken, 2018).

Δεύτερο κρίσιμο υποσύστημα αποτελούν οι ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, οι οποίες καλύπτουν τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου για τη λειτουργία των βοηθητικών και ξενοδοχειακών φορτίων. Οι γεννήτριες συχνά λειτουργούν σε μερικά φορτία, ιδιαίτερα σε καταστάσεις χαμηλής ζήτησης ισχύος, γεγονός που μειώνει την απόδοσή τους (Anvari et al., 2017) και αυξάνει την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους αποτελεί βασικό πεδίο εφαρμογής σύγχρονων τεχνολογιών διαχείρισης ενέργειας. Τα βοηθητικά συστήματα του πλοίου, όπως αντλίες, συστήματα ψύξης, αφαλάτωσης, αερισμού και κλιματισμού, συμβάλλουν επίσης σημαντικά στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση. Αν και μεμονωμένα καταναλώνουν μικρότερα ποσοστά ισχύος σε σχέση με την κύρια πρόωση, το αθροιστικό τους φορτίο μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ειδικά σε επιβατηγά πλοία και πλοία με αυξημένες ξενοδοχειακές απαιτήσεις. Οι συνολικές ενεργειακές απώλειες ενός πλοίου προκύπτουν από συνδυασμό παραγόντων. Πέραν των θερμικών απωλειών της μηχανής, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι απώλειες τριβών στο σύστημα πρόωσης, που περιλαμβάνει τον άξονα, τα έδρανα και την έλικα. Η υδροδυναμική απόδοση της έλικας (Carlton, 2018), η κατάσταση της γάστρας και η παρουσία επικαθίσεων επηρεάζουν άμεσα την απαιτούμενη ισχύ και, κατ' επέκταση, την κατανάλωση καυσίμου.

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός συνδυασμού τεχνολογικών και λειτουργικών παρεμβάσεων. Στον τεχνολογικό τομέα, περιλαμβάνονται η χρήση αποδοτικότερων μηχανών, η βελτιστοποίηση των προωθητικών διατάξεων, η βελτίωση του σχεδιασμού της έλικας και του κύτους, καθώς και η αξιοποίηση συστημάτων ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας (Waste Heat Recovery Systems - WHRS) (Shu et al., 2013). Οι λύσεις αυτές στοχεύουν στη μείωση των απωλειών και στη βελτίωση

της συνολικής απόδοσης της ενεργειακής αλυσίδας. Παράλληλα, οι λειτουργικές παρεμβάσεις διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο. Η εφαρμογή πρακτικών όπως η πλεύση με χαμηλή ταχύτητα, ο βέλτιστος προγραμματισμός δρομολογίων, η τακτική συντήρηση της γάστρας και της έλικας και η εκπαίδευση του πληρώματος στη βέλτιστη ενεργειακή διαχείριση μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου χωρίς μεγάλες επενδύσεις κεφαλαίου.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά τα τελευταία χρόνια η εφαρμογή υβριδικών και εναλλακτικών συστημάτων ενέργειας, τα οποία επιτρέπουν την πιο ευέλικτη και αποδοτική διαχείριση της παραγόμενης ισχύος. Η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και ηλεκτρικής πρόωσης μπορεί να μειώσει δραστικά την κατανάλωση πρωτογενούς καυσίμου, ιδίως σε λειτουργικές καταστάσεις χαμηλού φορτίου (Geertsma et al., 2017). Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών στην πρόωση και στη διαχείριση ενέργειας των πλοίων αποτελεί πλέον βασικό στόχο της ναυτιλιακής βιομηχανίας, καθώς συνδέεται άμεσα τόσο με τη μείωση του λειτουργικού κόστους όσο και με τη συμμόρφωση με το διεθνές κανονιστικό πλαίσιο που έχει θεσπιστεί από τον International Maritime Organization. Στο πλαίσιο αυτό, η ενεργειακή αποδοτικότητα αναδεικνύεται σε κρίσιμο παράγοντα βιωσιμότητας και ανταγωνιστικότητας της σύγχρονης ναυτιλίας.

2.2 Η Περιβαλλοντική Επίπτωση της Ναυτιλίας

Η ναυτιλία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλάδους των παγκόσμιων μεταφορών, διακινώντας άνω του 80% του παγκόσμιου εμπορίου σε όρους όγκου. Παρά τη συγκριτικά υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα των θαλάσσιων μεταφορών ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου, ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος της ναυτιλίας είναι ιδιαίτερα σημαντικός λόγω της κλίμακας των δραστηριοτήτων της. Σύμφωνα με διεθνείς εκτιμήσεις, η ναυτιλία ευθύνεται για περίπου 2–3% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ποσοστό το οποίο καθίσταται κρίσιμο στο πλαίσιο της παγκόσμιας προσπάθειας αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής (IMO, 2021).

Η ανησυχία εντείνεται περαιτέρω από το γεγονός ότι, εάν δεν ληφθούν αποτελεσματικά μέτρα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά έως το 2050 λόγω της ανόδου της ζήτησης (Smith et al., 2015). Η αύξηση αυτή συνδέεται άμεσα με τη συνεχιζόμενη άνοδο της ζήτησης για θαλάσσιες μεταφορές, την παγκοσμιοποίηση των εφοδιαστικών αλυσίδων και την οικονομική ανάπτυξη αναδυόμενων οικονομιών. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ναυτιλία κινδυνεύει να καταστεί δυσανάλογα μεγάλος ρυπαντής σε σχέση με άλλους τομείς των μεταφορών, εάν δεν επιταχυνθεί η υιοθέτηση αποδοτικότερων και καθαρότερων τεχνολογιών. Πέραν του διοξειδίου του άνθρακα, τα πλοία εκπέμπουν και άλλους ρύπους με σημαντικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Τα οξείδια του θείου (SO_x), που προκύπτουν κυρίως από τη χρήση καυσίμων υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, συμβάλλουν στη δημιουργία όξινης βροχής και στην υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα. Τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία σχηματίζονται σε υψηλές θερμοκρασίες καύσης, συνδέονται άμεσα με αναπνευστικά προβλήματα και την υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα στις παράκτιες ζώνες (Sofiev et al., 2018). Παράλληλα, τα αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter – PM), ιδιαίτερα τα λεπτά σωματίδια, διεισδύουν βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα, αυξάνοντας τον κίνδυνο καρδιοαναπνευστικών παθήσεων.

Οι επιπτώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα έντονες σε λιμενικές και παράκτιες περιοχές, όπου η συγκέντρωση της ναυτιλιακής δραστηριότητας είναι αυξημένη και η έκθεση του πληθυσμού στους ρύπους είναι άμεση. Σε πολλές μεγάλες πόλεις-λιμάνια, οι εκπομπές από τα πλοία αποτελούν σημαντικό ποσοστό της συνολικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης, γεγονός που έχει οδηγήσει σε αυξανόμενη κοινωνική και πολιτική πίεση για την εφαρμογή αυστηρότερων περιβαλλοντικών μέτρων.

Ανταποκρινόμενος στις προκλήσεις αυτές, ο International Maritime Organization (IMO) έχει αναλάβει κεντρικό ρόλο στη διαμόρφωση του διεθνούς κανονιστικού πλαισίου για τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ναυτιλίας. Μέσω διεθνών συμβάσεων και κανονισμών, ο IMO επιδιώκει τόσο τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων όσο και τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων. Η προσέγγιση αυτή

συνδυάζει τεχνικά μέτρα, λειτουργικές βελτιώσεις και, μακροπρόθεσμα, τη μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα και τεχνολογίες χαμηλού ή μηδενικού άνθρακα.

Κεντρικό εργαλείο του κανονιστικού αυτού πλαισίου αποτελεί η Διεθνής Σύμβαση MARPOL και ειδικότερα το Παράρτημα VI (IMO, 2019) (MARPOL Annex VI), το οποίο ρυθμίζει τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από τα πλοία. Το Παράρτημα αυτό θέτει όρια στην περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο, καθώς και πρότυπα εκπομπών NOx για νέες και υφιστάμενες μηχανές, ανάλογα με την ημερομηνία κατασκευής τους και την περιοχή λειτουργίας. Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι Ζώνες Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs), οι οποίες έχουν καθοριστεί σε περιοχές με αυξημένη περιβαλλοντική ευαισθησία (Viana et al., 2015), όπως η Βόρεια Ευρώπη και οι ακτές της Βόρειας Αμερικής. Εντός των περιοχών αυτών, επιβάλλονται αυστηρότερα όρια εκπομπών SOx και NOx, απαιτώντας τη χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο ή την εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (Integration of Hybrid Systems, 2022). Οι ECAs λειτουργούν ως πιλοτικά πεδία εφαρμογής αυστηρότερων μέτρων, τα οποία συχνά επεκτείνονται σταδιακά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπλέον, από την 1η Μαΐου 2025, η Μεσόγειος Θάλασσα έχει οριστεί επίσημα ως Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών Οξειδίων του Θείου (Med SOx ECA), επιβάλλοντας το όριο του 0,10% m/m στην περιεκτικότητα θείου στα καύσιμα (IMO, 2022). Η εξέλιξη αυτή καθιστά τις υβριδικές λύσεις ακόμη πιο ελκυστικές για τα πλοία που δραστηριοποιούνται στην περιοχή, καθώς προσφέρουν ευελιξία στη συμμόρφωση.

Συνολικά, η περιβαλλοντική επίπτωση της ναυτιλίας αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που καθοδηγούν τη σύγχρονη τεχνολογική και κανονιστική εξέλιξη του κλάδου. Η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών και προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση καινοτόμων λύσεων, όπως τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας, τα οποία μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλίας στο μεταβατικό στάδιο προς την πλήρη απανθρακοποίηση.

2.3 Το Νομοθετικό Πλαίσιο του IMO για την Ενεργειακή Απόδοση

Ο IMO έχει θεσπίσει σειρά μέτρων και δεικτών ενεργειακής απόδοσης, οι οποίοι αποτελούν τη βάση για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των επιδόσεων των πλοίων ως προς τη χρήση ενέργειας (IMO, 2011; IMO, 2021).

Οι κυριότεροι είναι οι εξής:

2.3.1 Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης - Energy Efficiency Design Index (EEDI)

Ο δείκτης EEDI θεσπίστηκε το 2011 και εφαρμόζεται σε όλα τα νεότευκτα πλοία άνω των 400 GT. Εκφράζει την ποσότητα εκπομπών CO₂ ανά μονάδα μεταφορικού έργου (Bazari & Longva, 2011) (π.χ. g CO₂/ton-mile). Ο στόχος του είναι να προωθήσει το σχεδιασμό πλοίων με βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση. Ο IMO έχει ορίσει σταδιακές φάσεις μείωσης με την Phase 3 να έχει ήδη τεθεί σε ισχύ για πολλούς τύπους πλοίων, απαιτώντας μείωση έως και 30-50% σε σχέση με τη γραμμή βάσης (baseline).

2.3.2 Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υφισταμένων Πλοίων - Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)

Ο δείκτης EEXI εισήχθη την 1η Ιανουαρίου 2023 και αποτελεί ένα τεχνικό μέτρο που απαιτεί από τα υφιστάμενα πλοία να επιτύχουν επίπεδα απόδοσης παρόμοια με αυτά του EEDI (Zhu et al., 2022). Για τη συμμόρφωση, πολλά πλοία καταφεύγουν στον περιορισμό ισχύος (EPL), όμως η υιοθέτηση υβριδικών τεχνολογιών και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει τη βελτίωση του δείκτη χωρίς τη δραστική μείωση της επιχειρησιακής ταχύτητας.

2.3.3 Δείκτης Έντασης Άνθρακα - Carbon Intensity Indicator (CII)

Ο CII είναι ένας λειτουργικός δείκτης (operational indicator) που αξιολογεί την πραγματική απόδοση του πλοίου σε ετήσια βάση. Τα πλοία κατατάσσονται σε κλίμακα A-E (Lindstad et al., 2021). Τα υβριδικά συστήματα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά εδώ, καθώς επιτρέπουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας (zero-

emissions) κατά την αναμονή ή την πλεύση σε λιμένες, βελτιώνοντας σημαντικά την ετήσια βαθμολογία CII του πλοίου.

2.3.4 Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου - Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)

Το SEEMP αποτελεί υποχρεωτικό έγγραφο που περιλαμβάνει το πλάνο βελτίωσης της απόδοσης. Με τις πρόσφατες αλλαγές (SEEMP Part III), απαιτείται πλέον η τεκμηρίωση του τρόπου με τον οποίο το πλοίο θα επιτύχει τους στόχους του CII (DNV, 2022).

2.4 Τεχνολογικές Κατευθύνσεις για τη Μείωση Εκπομπών

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η μείωση των εκπομπών στη ναυτιλία μπορεί να επιτευχθεί μέσα από ένα μείγμα τεχνολογικών λύσεων (Bouman et al., 2017), που περιλαμβάνει:

2.4.1 Εναλλακτικά Καύσιμα

Η χρήση καθαρότερων καυσίμων, όπως LNG, μεθανόλη, αμμωνία, βιοκαύσιμα και υδρογόνο, αποτελεί μια από τις βασικές στρατηγικές για την απανθρακοποίηση του τομέα. Κάθε καύσιμο έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς σε θέματα αποθήκευσης, ενεργειακής πυκνότητας και κόστους (Inal et al., 2022).

2.4.2 Ανάκτηση Απορριπτόμενης Θερμότητας και Βέλτιστη Διαχείριση Ενέργειας

Συστήματα ανάκτησης θερμότητας (Waste Heat Recovery Systems – WHRS) αξιοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Systems – EMS) συμβάλλουν στη βέλτιστη κατανομή των φορτίων (Theotokatos & Livanos, 2013), μειώνοντας τις απώλειες και αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

2.4.3 Ηλεκτρική και Υβριδική Πρόωση

Η ηλεκτρική πρόωση, είτε σε πλήρως ηλεκτρικά είτε σε υβριδικά συστήματα, επιτρέπει τη λειτουργία των μηχανών σε βέλτιστα φορτία και τη μείωση των εκπομπών (Geertsma et al., 2017). Η συνδυασμένη χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης, μπαταριών και γεννητριών δημιουργεί ένα ευέλικτο ενεργειακό σύστημα που μπορεί να προσαρμόζεται στις επιχειρησιακές ανάγκες του πλοίου.

2.4.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στη Ναυτιλία

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ, ανεμογεννητριών ή συστημάτων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας (π.χ. *Flettner rotors*) συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου (Chou et al., 2021). Αν και η συμβολή τους είναι ακόμη περιορισμένη, συνδυαζόμενες με υβριδικά συστήματα μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη.

2.5 Ο Ρόλος των Υβριδικών Συστημάτων στο Πλαίσιο της Νομοθεσίας

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας ανταποκρίνονται άμεσα στους στόχους των παραπάνω κανονισμών του IMO. Επιτρέπουν τη μείωση του EEXI μέσω βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, ενώ διευκολύνουν τη διατήρηση χαμηλών τιμών CII χάρη στη δυνατότητα λειτουργίας των μηχανών σε βέλτιστα φορτία ή την πλήρη απενεργοποίησή τους σε χαμηλές ταχύτητες. Επιπλέον, η χρήση μπαταριών και άλλων μέσων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει τη λειτουργία μηδενικών εκπομπών σε συγκεκριμένες περιοχές, όπως τα λιμάνια ή οι ECAs. Κατά συνέπεια, τα υβριδικά συστήματα θεωρούνται μεταβατική τεχνολογία που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των σημερινών συμβατικών συστημάτων και των μελλοντικών πλήρως μηδενικών εκπομπών (zero-emission ships) και προσφέρουν το πλεονέκτημα της "ευελιξίας καυσίμου (Fuel Flexibility)". Δηλαδή, μια υβριδική εγκατάσταση με ηλεκτρικό δίκτυο (DC grid) είναι πολύ πιο εύκολο να δεχτεί μελλοντικά Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells) ή νέα καύσιμα, μειώνοντας το ρίσκο απαξίωσης του πλοίου (stranded assets).

Κεφάλαιο 3 - Υβριδικά Συστήματα Πρόωσης και Ενέργειας – Τεχνολογική Επισκόπηση

Η σύγχρονη ναυτιλία βρίσκεται σε μια φάση ριζικού μετασχηματισμού, όπου η διατήρηση της επιχειρησιακής ικανότητας πρέπει πλέον να συνυπάρχει με τη δραστική μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος. Καθώς τα παραδοσιακά συστήματα πρόωσης, βασισμένα αποκλειστικά σε μηχανές εσωτερικής καύσης, προσεγγίζουν τα όρια της θερμοδυναμικής τους απόδοσης, η ανάγκη για νέες αρχιτεκτονικές καθίσταται επιτακτική. Στο πλαίσιο αυτό, τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας αναδεικνύονται ως η πλέον ρεαλιστική λύση, προσφέροντας μια σταδιακή μετάβαση προς την απανθρακοποίηση χωρίς την ανάγκη πλήρους απόρριψης των δοκιμασμένων τεχνολογιών (Geertsma et al., 2017). Τα συστήματα αυτά αποτελούν το αποτέλεσμα της ευρύτερης ηλεκτροποίησης των πλοίων και της ενσωμάτωσης προηγμένων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας (Banaei et al., 2023). Η βασική τους διαφοροποίηση έγκειται στην ικανότητά τους να αποσυνδέουν τη ζήτηση ισχύος από την άμεση παραγωγή της. Ενώ στα συμβατικά πλοία η μηχανή πρέπει να αποκρίνεται άμεσα σε κάθε μεταβολή φορτίου (συχνά λειτουργώντας σε μη αποδοτικές περιοχές), τα υβριδικά συστήματα επιτρέπουν τον συνδυασμό διαφορετικών πηγών —όπως πετρελαιοκινητήρες, συσσωρευτές και κυψέλες καυσίμου— εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη λειτουργία κάθε μονάδας (Inal & Deniz, 2021). Η τεχνολογική αυτή προσέγγιση προσφέρει αυξημένη ευελιξία, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού προφίλ του πλοίου σε όλο το φάσμα της λειτουργίας του, από τους ελιγμούς στο λιμάνι έως την πλεύση σε ανοικτή θάλασσα (Boveri et al., 2023).

3.1 Ορισμός και Αρχή Λειτουργίας των Υβριδικών Συστημάτων

Ως υβριδικό σύστημα πρόωσης και ενέργειας στη ναυτιλία ορίζεται το ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα στο οποίο συνδυάζονται δύο ή περισσότερες τεχνολογίες παραγωγής, μετατροπής ή αποθήκευσης ενέργειας (DNV, 2022). Ο συνδυασμός αυτός αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της συνολικής ενεργειακής συμπεριφοράς του πλοίου, καλύπτοντας τόσο τις απαιτήσεις της κύριας πρόωσης όσο και των βοηθητικών φορτίων, με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και της μηχανικής καταπόνησης του εξοπλισμού (Geertsma et al., 2017).

Στην πιο διαδεδομένη μορφή τους, τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν μηχανές εσωτερικής καύσης, ηλεκτρικές μηχανές που λειτουργούν ως κινητήρες ή γεννήτριες, καθώς και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy

Storage Systems – ESS), όπως συσσωρευτές ιόντων λιθίου ή υπερπυκνωτές (Inal & Deniz, 2021).

Η βασική αρχή λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων στηρίζεται στην αποσύνδεση της ζήτησης ισχύος από την άμεση παραγωγή της. Ενώ στα συμβατικά συστήματα η μηχανή καλείται να ανταποκριθεί σε ένα ευρύ φάσμα φορτίων —συχνά λειτουργώντας με υψηλή Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (SFOC)— στην υβριδική αρχιτεκτονική η μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργεί σε περιορισμένο και αποδοτικό εύρος, κοντά στο σημείο μέγιστης θερμοδυναμικής απόδοσης (Boveri et al., 2023). Οι διακυμάνσεις και οι αιχμές φορτίου καλύπτονται από το ESS (Peak Shaving), εξασφαλίζοντας την εξομάλυνση του φορτίου της μηχανής.

Ένα ακόμη κρίσιμο χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ διαφορετικών ενεργειακών καταστάσεων (Operational Modes). Το πλοίο μπορεί να λειτουργεί σε αμιγώς μηχανική, αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία μηδενικών εκπομπών (Zero-Emission Mode) ή συνδυαστική λειτουργία. Η ευελιξία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά τους ελιγμούς σε λιμένες ή την πλεύση σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, όπου η ηλεκτρική λειτουργία εκμηδενίζει τις τοπικές εκπομπές ρύπων και μειώνει δραστικά τον υποβρύχιο θόρυβο (Banaei et al., 2023). Η καρδιά αυτής της ολιστικής προσέγγισης είναι το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System – EMS). Ως ο «εγκέφαλος» του συστήματος, το EMS συλλέγει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και λαμβάνει αποφάσεις για τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα λειτουργεί πάντα με τη μέγιστη δυνατή αξιοπιστία και αποδοτικότητα (Kalikatzarakis et al., 2022).

3.2 Κατηγορίες Υβριδικών Συστημάτων

Η ταξινόμηση των υβριδικών συστημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση την αρχιτεκτονική τους διάταξη, τον βαθμό ηλεκτροποίησης και τον τρόπο συνεργασίας των επιμέρους πηγών ισχύος. Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς κάθε αρχιτεκτονική παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς (Boveri et al., 2023).

3.2.1 Σειριακά Υβριδικά Συστήματα

Στην αρχιτεκτονική αυτή η μηχανή εσωτερικής καύσης δεν συνδέεται μηχανικά με τον άξονα της προπέλας, αλλά λειτουργεί αποκλειστικά ως μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μηχανική ισχύς της μηχανής μετατρέπεται

σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρογεννήτριας και στη συνέχεια η ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται σε ηλεκτροκινητήρες πρόωσης που είναι υπεύθυνοι για την περιστροφή της προπέλας.

Η συνολική απόδοση του συστήματος (η_{tot}) περιγράφεται από το γινόμενο των επιμέρους αποδόσεων:

$$\eta_{tot} = \eta_{ice} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{conv} \cdot \eta_{motor}$$

Όπου η_{ice} η θερμική απόδοση της μηχανής, η_{gen} της γεννήτριας, η_{conv} των μετατροπέων ισχύος και η_{motor} του ηλεκτροκινητήρα (Geertsma et al., 2017).

Η βασική ενεργειακή αλυσίδα του συστήματος περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια μετατροπής ενέργειας, τα οποία ξεκινούν από την καύση του καυσίμου στη μηχανή εσωτερικής καύσης και καταλήγουν στην παραγωγή μηχανικής ισχύος στον άξονα της προπέλας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από γεννήτριες, τη μετατροπή και ρύθμιση της ισχύος μέσω ηλεκτρονικών ισχύος και τελικά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ισχύ μέσω ηλεκτροκινητήρων πρόωσης. Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται συνήθως σε ένα κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος, το οποίο μπορεί να είναι είτε εναλλασσόμενου ρεύματος είτε συνεχούς ρεύματος. Το δίκτυο αυτό λειτουργεί ως ενεργειακός κόμβος, επιτρέποντας την κατανομή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας τόσο προς τους κινητήρες πρόωσης όσο και προς τα βοηθητικά συστήματα του πλοίου. Η χρήση κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό του πλοίου, καθώς οι γεννήτριες και οι κινητήρες πρόωσης δεν απαιτείται να βρίσκονται σε άμεση μηχανική ευθυγράμμιση.

Σημαντικό στοιχείο των σειριακών υβριδικών συστημάτων αποτελεί η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως συστοιχίες συσσωρευτών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Οι συσσωρευτές αυτοί επιτρέπουν την προσωρινή αποθήκευση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας και την παροχή ισχύος σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται εξομάλυνση των φορτίων και αποφεύγεται η ανάγκη λειτουργίας των μηχανών σε μη αποδοτικά επίπεδα φορτίου.

Η λειτουργία του συστήματος ελέγχεται από ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, το οποίο συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες και συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα αυτό αξιολογεί παραμέτρους όπως η ζήτηση ισχύος πρόωσης, η κατάσταση φόρτισης των

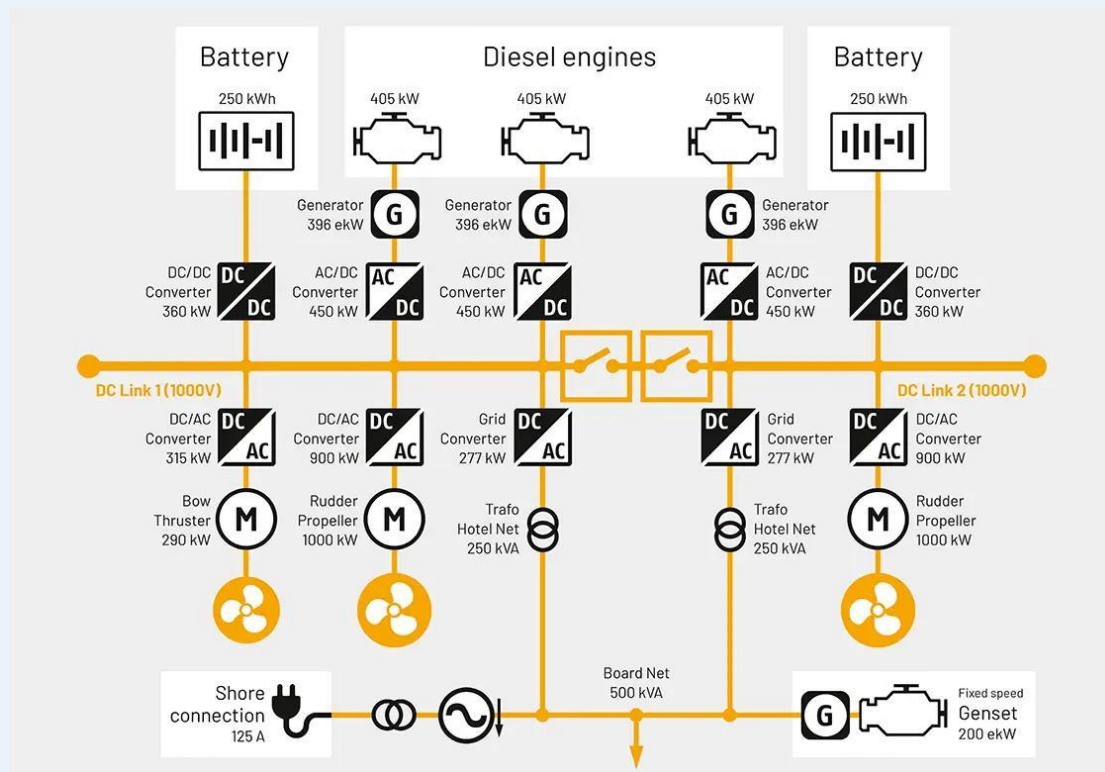
συσσωρευτών, η απόδοση των γεννητριών και οι λειτουργικές απαιτήσεις του πλοίου. Με βάση τα δεδομένα αυτά, το σύστημα καθορίζει τη βέλτιστη κατανομή της ισχύος μεταξύ των διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Από τεχνικής πλευράς, η βασική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση των σειριακών υβριδικών συστημάτων είναι η θερμική απόδοση της μηχανής εσωτερικής καύσης και η απόδοση των επιμέρους σταδίων μετατροπής ενέργειας. Η συνολική απόδοση του συστήματος εξαρτάται από το γινόμενο των επιμέρους αποδόσεων της γεννήτριας, των ηλεκτρονικών ισχύος και του ηλεκτροκινητήρα πρόωσης. Στη σύγχρονη ναυπηγική πρακτική, οι αποδόσεις των ηλεκτροκινητήρων πρόωσης μπορεί να υπερβαίνουν το 95%, ενώ τα ηλεκτρονικά ισχύος παρουσιάζουν αποδόσεις της τάξης του 97 έως 99%.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της σειριακής αρχιτεκτονικής είναι η δυνατότητα λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης σε σχετικά σταθερό και αποδοτικό εύρος φορτίου. Στα συμβατικά συστήματα πρόωσης οι μηχανές συχνά λειτουργούν σε μερικά φορτία, όπου η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται σημαντικά. Στα σειριακά υβριδικά συστήματα η ισχύς που απαιτείται για την πρόωση μπορεί να εξισορροπείται μέσω των συσσωρευτών, επιτρέποντας στις μηχανές να λειτουργούν κοντά στο σημείο μέγιστης θερμικής απόδοσης. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει τη λειτουργία του πλοίου σε πλήρως ηλεκτρική κατάσταση κατά τη διάρκεια ελιγμών σε λιμένες ή κατά την παραμονή σε αγκυροβόλιο. Η δυνατότητα αυτή μειώνει σημαντικά τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων σε περιοχές υψηλής περιβαλλοντικής ευαισθησίας και συμβάλλει στη συμμόρφωση με τις διεθνείς περιβαλλοντικές απαιτήσεις.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, τα σειριακά υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς που σχετίζονται με τις ενεργειακές απώλειες των πολλαπλών μετατροπών ισχύος. Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και στη συνέχεια εκ νέου σε μηχανική συνεπάγεται αναπόφευκτες απώλειες, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Για τον λόγο αυτό, η αρχιτεκτονική αυτή εφαρμόζεται συχνότερα σε πλοία μικρών και μεσαίων απαιτήσεων ισχύος, όπως επιβατηγά πλοία μικρών αποστάσεων, ερευνητικά σκάφη και πλοία ειδικών αποστολών.

Συνολικά, τα σειριακά υβριδικά συστήματα αποτελούν μία ώριμη τεχνολογική λύση για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων και την ενσωμάτωση τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης στη ναυτιλία. Η δυνατότητα ευέλικτης διαχείρισης της ισχύος, η μείωση των εκπομπών και η

βελτιστοποίηση της λειτουργίας των μηχανών καθιστούν την αρχιτεκτονική αυτή ιδιαίτερα κατάλληλη για πλοία με μεταβαλλόμενα προφίλ λειτουργίας και αυξημένες απαιτήσεις περιβαλλοντικής συμμόρφωσης.



Σχήμα 1: Hybrid drive designed in series, <https://www.baumueller.com>

Το σχήμα 1 παρουσιάζει ένα υβριδικό ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης πλοίου τύπου diesel–electric με αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες. Το σύστημα βασίζεται σε ένα κεντρικό δίκτυο συνεχούς τάσης (DC bus ή DC link), στο οποίο συνδέονται οι πηγές παραγωγής ενέργειας, οι συστοιχίες αποθήκευσης και τα φορτία πρόωσης. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα πλοίου στο οποίο η ισχύς μεταφέρεται κυρίως σε ηλεκτρική μορφή και όχι μέσω άμεσης μηχανικής μετάδοσης.

Στο επάνω μέρος του διαγράμματος φαίνονται δύο συστοιχίες μπαταριών χωρητικότητας 250 kWh η καθεμία. Οι μπαταρίες λειτουργούν ως σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο μέσω μετατροπέων DC/DC ισχύος περίπου 360 kW. Οι μετατροπείς αυτοί ρυθμίζουν την τάση και τη ροή ισχύος μεταξύ της μπαταρίας και του κεντρικού δικτύου συνεχούς τάσης. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπεται τόσο η

φόρτιση των μπαταριών όταν υπάρχει πλεονάζουσα ενέργεια στο σύστημα όσο και η παροχή ενέργειας από τις μπαταρίες προς το δίκτυο όταν απαιτείται.

Στο κεντρικό επάνω τμήμα εμφανίζονται τρεις πετρελαιοκινητήρες ισχύος περίπου 405 kW ο καθένας. Κάθε κινητήρας συνδέεται μηχανικά με μία ηλεκτρική γεννήτρια ισχύος περίπου 396 kW. Οι κινητήρες αυτοί δεν συνδέονται άμεσα με την προπέλα του πλοίου αλλά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια που παράγεται από τις γεννήτριες είναι εναλλασσόμενου ρεύματος και μετατρέπεται σε συνεχές μέσω μετατροπών AC/DC ισχύος περίπου 450 kW. Μετά τη μετατροπή, η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτεί το κεντρικό δίκτυο συνεχούς τάσης.

Το κύριο ενεργειακό δίκτυο του πλοίου αποτελείται από δύο αγωγούς συνεχούς τάσης που ονομάζονται DC Link 1 και DC Link 2 και λειτουργούν σε τάση περίπου 1000 V. Οι δύο αυτοί αγωγοί μπορούν να λειτουργούν είτε ανεξάρτητα είτε συνδεδεμένοι μεταξύ τους μέσω διακοπών ισχύος. Η ύπαρξη δύο ξεχωριστών DC γραμμών αυξάνει την αξιοπιστία και την ευελιξία του συστήματος, επιτρέποντας καλύτερη κατανομή φορτίου και εφεδρεία σε περίπτωση βλάβης.

Στο κάτω μέρος του συστήματος φαίνονται τα φορτία πρόωσης του πλοίου. Οι προπέλες κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες που τροφοδοτούνται από το DC δίκτυο μέσω μετατροπών DC/AC. Οι μετατροπείς αυτοί μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα του DC link σε εναλλασσόμενο ρεύμα κατάλληλης συχνότητας και τάσης ώστε να λειτουργούν οι κινητήρες πρόωσης. Δύο ηλεκτρικοί κινητήρες ισχύος περίπου 1000 kW κινούν τις κύριες προπέλες του πλοίου, ενώ ένας μικρότερος κινητήρας περίπου 290 kW κινεί τον bow thruster, δηλαδή την πλευρική προπέλα πλώρης που χρησιμοποιείται για ελιγμούς κατά τη διάρκεια πρόσδεσης και χειρισμών στο λιμάνι.

Το σύστημα τροφοδοτεί επίσης τα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, τα οποία αναφέρονται ως hotel load ή board net. Η τροφοδότηση αυτών των φορτίων γίνεται μέσω μετατροπών grid converter DC/AC που μετατρέπουν την τάση του DC link σε εναλλασσόμενη τάση κατάλληλη για το εσωτερικό ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου. Η ενέργεια αυτή οδηγείται στη συνέχεια μέσω μετασχηματιστών προς το δίκτυο καταναλωτών του πλοίου, το οποίο τροφοδοτεί φωτισμό, κλιματισμό, εξοπλισμό πλοήγησης και λοιπά βοηθητικά συστήματα.

Στο κάτω μέρος του διαγράμματος εμφανίζεται επίσης μια σύνδεση με την ξηρά, η οποία επιτρέπει την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο όταν βρίσκεται στο λιμάνι. Μέσω αυτής της σύνδεσης το πλοίο μπορεί να λειτουργεί χωρίς να χρησιμοποιεί τους πετρελαιοκινητήρες του, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων. Επιπλέον εμφανίζεται ένα βοηθητικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος σταθερών στροφών ισχύος περίπου 200 kW που μπορεί να παρέχει επιπλέον ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο του πλοίου όταν απαιτείται. Από πλευράς αρχιτεκτονικής πρόωσης, η διάταξη που φαίνεται στην εικόνα είναι σειριακή υβριδική διάταξη. Στη σειριακή διάταξη οι κινητήρες εσωτερικής καύσης δεν συνδέονται μηχανικά με τις προπέλες. Οι κινητήρες λειτουργούν αποκλειστικά ως γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας και η παραγόμενη ισχύς μεταφέρεται ηλεκτρικά μέσω του DC δικτύου στους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι οι μόνοι που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση για την περιστροφή των προπελών.

Συνολικά, η εικόνα παρουσιάζει ένα σύγχρονο υβριδικό σύστημα πρόωσης πλοίου με κεντρικό δίκτυο συνεχούς τάσης, στο οποίο συνδυάζονται πετρελαιοκινητήρες, γεννήτριες, συστοιχίες μπαταριών, ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος και ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει καλύτερη διαχείριση ενέργειας, μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση, μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και περιορισμό των εκπομπών ρύπων σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα μηχανικής πρόωσης.

3.2.2 Παράλληλα Υβριδικά Συστήματα

Τα παράλληλα υβριδικά συστήματα πρόωσης αποτελούν μια προηγμένη τεχνολογική λύση που επιδιώκει να συνδυάσει την υψηλή απόδοση των συμβατικών μηχανών εσωτερικής καύσης με την ευελιξία της ηλεκτρικής κίνησης. Η θεμελιώδης διαφορά τους από τα σειριακά συστήματα έγκειται στη μηχανική σύζευξη της κύριας μηχανής και του ηλεκτροκινητήρα στον ίδιο άξονα που περιστρέφει την προπέλα. Αυτή η διάταξη επιτρέπει στο πλοίο να λαμβάνει ώθηση είτε από τη μία πηγή ισχύος ανεξάρτητα, είτε και από τις δύο ταυτόχρονα, προσφέροντας έτσι σημαντική επιχειρησιακή προσαρμοστικότητα (Geertsma et al., 2017).

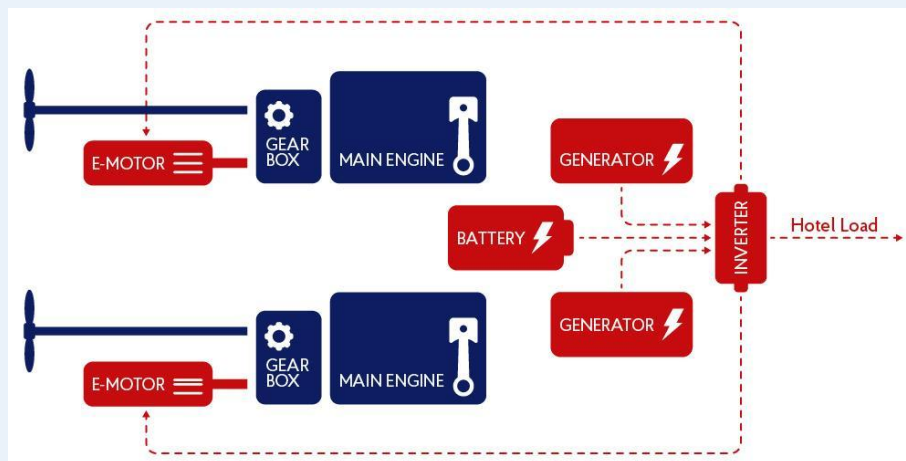
Η καρδιά της παράλληλης αρχιτεκτονικής είναι το σύστημα μετάδοσης, το οποίο μέσω ειδικών κιβωτίων ταχυτήτων και συμπλεκτών (μηχανισμών σύζευξης), επιτρέπει τη διαχείριση της ροής ισχύος. Σε αυτό το πλαίσιο, ο ηλεκτροκινητήρας παίζει διπλό ρόλο. Όταν λειτουργεί ως «βοηθητικός

κινητήρας» (κατάσταση γνωστή διεθνώς ως Power Take-In ή PTI), προσθέτει τη δύναμή του στην κύρια μηχανή για να επιτευχθούν υψηλότερες ταχύτητες ή για να καλυφθούν απότομες αυξήσεις στο φορτίο. Αντίθετα, όταν η κύρια μηχανή περιστρέφει τον ηλεκτροκινητήρα ώστε αυτός να παράγει ρεύμα (λειτουργία ως γεννήτρια, γνωστή ως Power Take-Off ή PTO), η ενέργεια χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών ή την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του πλοίου, όπως ο φωτισμός και ο κλιματισμός (Boveri et al., 2023).

Από ενεργειακής σκοπιάς, το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι η υψηλή συνολική απόδοση κατά την κανονική πλεύση. Επειδή η ισχύς της μηχανής μεταδίδεται απευθείας στην προπέλα μηχανικά, αποφεύγονται οι ενδιάμεσες απώλειες που προκύπτουν όταν η ενέργεια μετατρέπεται από μηχανική σε ηλεκτρική και ξανά σε μηχανική, όπως συμβαίνει στα σειριακά συστήματα (Banaei et al., 2023). Αυτό καθιστά την παράλληλη αρχιτεκτονική ιδανική για πλοία που ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις με σταθερή ταχύτητα, καθώς διατηρείται χαμηλή η ειδική κατανάλωση καυσίμου.

Παράλληλα, η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι συστοιχίες μπαταριών, ενισχύει την αξιοπιστία και την περιβαλλοντική συμμόρφωση του σκάφους. Οι μπαταρίες επιτρέπουν τη λειτουργία «μηδενικών εκπομπών» μέσα στα λιμάνια, όπου η κύρια μηχανή μπορεί να σβήσει εντελώς και το πλοίο να κινείται αμιγώς ηλεκτρικά, μειώνοντας τον θόρυβο και τους ρύπους (Inal & Deniz, 2021). Επιπλέον, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (ο «εγκέφαλος» του πλοίου) εξασφαλίζει ότι η μηχανή λειτουργεί πάντα στο βέλτιστο σημείο της, χρησιμοποιώντας τις μπαταρίες για να απορροφά τις αυξομειώσεις της ζήτησης, μια τεχνική που ονομάζεται «εξομάλυνση αιχμών φορτίου» (Peak Shaving).

Τέλος, η παράλληλη διάταξη προσφέρει αυξημένη ασφάλεια, καθώς λειτουργεί ως εφεδρικό σύστημα. Σε περίπτωση βλάβης της κύριας μηχανής, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να αναλάβει την κίνηση του πλοίου (λειτουργία «επιστροφής στο λιμάνι»), εξασφαλίζοντας ότι το σκάφος δεν θα μείνει ακυβέρνητο (Kalikatzarakis et al., 2022). Παρά την αυξημένη μηχανική πολυπλοκότητα που απαιτεί ο συγχρονισμός των δύο πηγών ισχύος, η παράλληλη αρχιτεκτονική παραμένει μια από τις πιο αποδοτικές και δημοφιλείς επιλογές για τη σύγχρονη, "πράσινη" ναυτιλία.



Σχήμα 2: Διάταξη παράλληλου υβριδικού συστήματος πρόωσης πλοίου, <https://seapower.com>

Στο αριστερό τμήμα του σχήματος 2 φαίνονται δύο προωθητικές γραμμές του πλοίου, δηλαδή δύο ανεξάρτητα συστήματα μετάδοσης κίνησης προς τις προπέλες. Κάθε γραμμή πρόωσης αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα, ένα κιβώτιο μετάδοσης και μια κύρια μηχανή. Η προπέλα βρίσκεται στο άκρο του άξονα και μετατρέπει τη μηχανική ισχύ σε ώση που κινεί το πλοίο στο νερό. Ο ηλεκτροκινητήρας (E-Motor) είναι τοποθετημένος στον ίδιο άξονα μετάδοσης με την κύρια μηχανή. Ο κινητήρας αυτός μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Όταν λειτουργεί ως κινητήρας, μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ισχύ και συμβάλλει στην περιστροφή της προπέλας. Όταν λειτουργεί ως γεννήτρια, μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την περιστροφή του άξονα.

Μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα και της κύριας μηχανής βρίσκεται το κιβώτιο μετάδοσης (gearbox). Το κιβώτιο αυτό προσαρμόζει τις στροφές της μηχανής στις απαιτήσεις της προπέλας και επιτρέπει τη μηχανική σύζευξη των δύο συστημάτων ισχύος στον ίδιο άξονα. Η κύρια μηχανή είναι συνήθως μηχανή ντίζελ και αποτελεί την κύρια πηγή μηχανικής ισχύος για την πρόωση του πλοίου κατά τη διάρκεια της κανονικής πλεύσης. Στο δεξί τμήμα της εικόνας παρουσιάζεται το ηλεκτρικό ενεργειακό σύστημα του πλοίου. Εκεί φαίνονται δύο ηλεκτρογεννήτριες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από βοηθητικές μηχανές. Η ηλεκτρική αυτή ισχύς μεταφέρεται μέσω ενός μετατροπέα ισχύος (inverter). Ο μετατροπέας αυτός αποτελεί βασικό στοιχείο των υβριδικών συστημάτων, διότι ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος ώστε να είναι κατάλληλο για τη λειτουργία των ηλεκτροκινητήρων και των λοιπών ηλεκτρικών καταναλωτών. Κεντρικό στοιχείο του συστήματος είναι η συστοιχία μπαταριών. Η μπαταρία λειτουργεί ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και επιτρέπει τη συσσώρευση ηλεκτρικής ισχύος όταν η παραγωγή

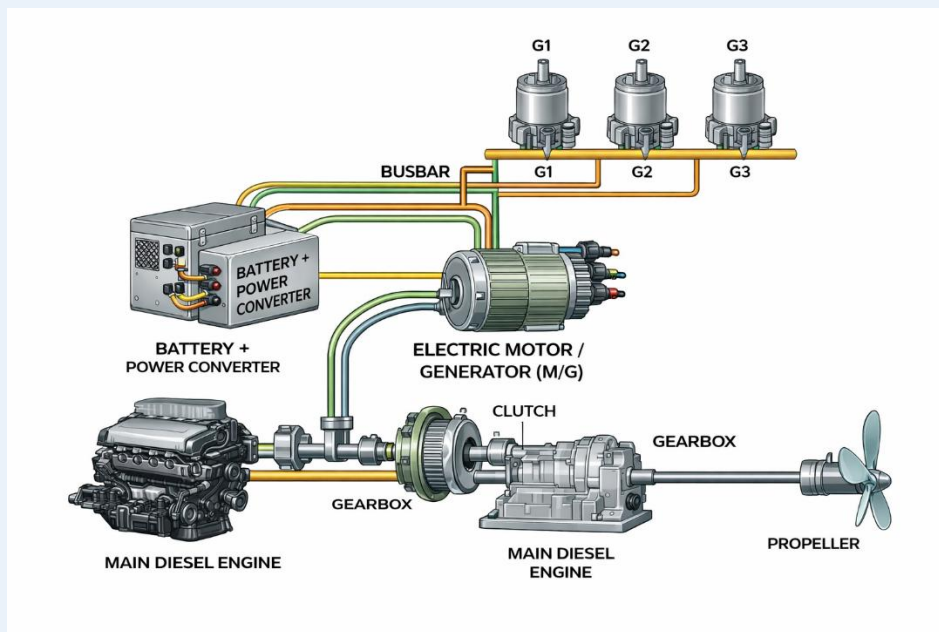
ενέργειας υπερβαίνει τη ζήτηση. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη της πρόωσης ή για την κάλυψη αιχμών φορτίου χωρίς να απαιτείται η εκκίνηση επιπλέον γεννητριών.

Οι διακεκομμένες γραμμές στο διάγραμμα δείχνουν τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα στο σύστημα. Μέσω του μετατροπέα ισχύος, η ενέργεια από τις γεννήτριες και τις μπαταρίες κατανέμεται είτε προς τους ηλεκτροκινητήρες είτε προς τα λεγόμενα ξενοδοχειακά φορτία του πλοίου. Τα φορτία αυτά, τα οποία στην εικόνα αναφέρονται ως “hotel load”, περιλαμβάνουν όλα τα ηλεκτρικά συστήματα που δεν σχετίζονται άμεσα με την πρόωση, όπως φωτισμός, κλιματισμός, συστήματα πλοήγησης, αντλίες και λοιπός βοηθητικός εξοπλισμός. Η διάταξη αυτή επιτρέπει στο πλοίο να λειτουργεί με διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Κατά την κανονική πλεύση η κύρια μηχανή παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της μηχανικής ισχύος για την πρόωση. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται επιπλέον ισχύς, όπως κατά την επιτάχυνση ή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά χρησιμοποιώντας ενέργεια από τις μπαταρίες ή από τις γεννήτριες. Αντίθετα, σε χαμηλές ταχύτητες ή κατά την είσοδο σε λιμένες, το πλοίο μπορεί να κινηθεί κυρίως με ηλεκτρική ισχύ, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων.

Συνολικά, το διάγραμμα παρουσιάζει ένα υβριδικό σύστημα πρόωσης τύπου παράλληλης αρχιτεκτονικής, όπου η μηχανή εσωτερικής καύσης και ο ηλεκτροκινητήρας μπορούν να παρέχουν ισχύ στον ίδιο άξονα πρόωσης. Η συνδυασμένη λειτουργία των μηχανικών και ηλεκτρικών πηγών ενέργειας προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη λειτουργία του πλοίου, βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση και συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων.

3.2.3 Σειριακά–Παράλληλα Υβριδικά Συστήματα

Παρακάτω στο σχήμα 3, παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός υβριδικού συστήματος πρόωσης τύπου series–parallel, το οποίο συνδυάζει τόσο τη σειριακή όσο και την παράλληλη αρχιτεκτονική μετάδοσης ισχύος.



Σχήμα 3: Διάταξη υβριδικού συστήματος πρόωσης πλοίου με ηλεκτρομηχανή άξονα (PTO/PTI) και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Το παραπάνω σύστημα αποτελεί μία υβριδική διάταξη πρόωσης πλοίου στην οποία συνδυάζονται μηχανικές και ηλεκτρικές πηγές ενέργειας, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να λειτουργεί τόσο ως σειριακό όσο και ως παράλληλο υβριδικό σύστημα. Στην καρδιά της διάταξης βρίσκεται ο κύριος κινητήρας ντίζελ, ο οποίος αποτελεί την κύρια πηγή μηχανικής ισχύος του πλοίου. Ο κινητήρας αυτός συνδέεται με το κιβώτιο ταχυτήτων μέσω ενός μηχανικού συζεύκτη (coupling), ενώ μεταξύ του ηλεκτρικού συστήματος και του κιβωτίου παρεμβάλλεται ένας συμπλέκτης (clutch). Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει τον ρόλο της προσαρμογής των στροφών και της ροπής ώστε η περιστροφή να μεταφέρεται αποτελεσματικά στον άξονα της προπέλας (Geertsma et al., 2017). Από το κιβώτιο η μηχανική ενέργεια μεταδίδεται στον άξονα πρόωσης και τελικά στην προπέλα, η οποία μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε ώθηση μέσα στο νερό.

Στο ίδιο σύστημα μετάδοσης βρίσκεται εγκατεστημένη μία ηλεκτρική μηχανή τύπου motor/generator (M/G), η οποία μπορεί να λειτουργήσει είτε ως ηλεκτρικός κινητήρας είτε ως ηλεκτρική γεννήτρια. Όταν λειτουργεί ως κινητήρας, λαμβάνει ηλεκτρική ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου (Boveri et al., 2023) και την μετατρέπει σε μηχανική ροπή, συμβάλλοντας στην περιστροφή του άξονα πρόωσης. Όταν λειτουργεί ως γεννήτρια, μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια που προέρχεται από τον κινητήρα ντίζελ σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου. Η λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής συνδέεται με το ηλεκτρικό σύστημα μέσω ενός ζυγού

ισχύος (busbar), ο οποίος αποτελεί τον κεντρικό κόμβο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στον ίδιο ζυγό συνδέονται επίσης οι βοηθητικές γεννήτριες του πλοίου (G1, G2, G3), οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για τις ανάγκες του συστήματος πρόωσης και των ηλεκτρικών φορτίων του πλοίου.

Στο ηλεκτρικό κύκλωμα περιλαμβάνεται επίσης μία συστοιχία μπαταριών η οποία συνδέεται με μετατροπέα ισχύος. Η μπαταρία λειτουργεί ως αποθήκη ενέργειας και μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ισχύ στον ηλεκτρικό κινητήρα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αθόρυβη λειτουργία ή χαμηλές ταχύτητες. Παράλληλα, μπορεί να φορτίζεται είτε από τις βοηθητικές γεννήτριες είτε από την ηλεκτρική μηχανή όταν αυτή λειτουργεί ως γεννήτρια κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα ντίζελ. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται διαχείριση της ενέργειας και βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος.

Η υβριδική αυτή διάταξη επιτρέπει διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Σε λειτουργία καθαρά ηλεκτρικής πρόωσης, ο κινητήρας ντίζελ αποσυνδέεται μέσω του συμπλέκτη και η προπέλα κινείται αποκλειστικά από τον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος τροφοδοτείται από τις μπαταρίες ή τις γεννήτριες. Σε λειτουργία συμβατικής μηχανικής πρόωσης, ο κινητήρας ντίζελ συνδέεται με το κιβώτιο και κινεί άμεσα την προπέλα, ενώ η ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργεί ως γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια για το πλοίο. Σε λειτουργία υβριδικής ενίσχυσης ισχύος, τόσο ο κινητήρας ντίζελ όσο και ο ηλεκτρικός κινητήρας παρέχουν ταυτόχρονα ροπή στον άξονα πρόωσης, αυξάνοντας την επιτάχυνση και την διαθέσιμη ισχύ. Επιπλέον υπάρχει και λειτουργία φόρτισης, όπου ο κινητήρας ντίζελ περιστρέφει την ηλεκτρική μηχανή ώστε να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια για τη φόρτιση των μπαταριών.

Ο λόγος για τον οποίο η αρχιτεκτονική αυτή ονομάζεται series-parallel είναι επειδή επιτρέπει τόσο σειριακή όσο και παράλληλη ροή ενέργειας. Η ευελιξία αυτή επιτρέπει στο πλοίο να εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα και των δύο κόσμων: την υψηλή απόδοση της άμεσης μηχανικής μετάδοσης σε υψηλές ταχύτητες και την αποδοτικότητα της ηλεκτρικής πρόωσης σε χαμηλά φορτία (Zhu et al., 2022). Ο συνδυασμός των δύο αυτών αρχιτεκτονικών προσφέρει υψηλή ευελιξία λειτουργίας, μειωμένη κατανάλωση καυσίμου, χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και δυνατότητα βελτιστοποίησης της λειτουργίας του πλοίου ανάλογα με τις απαιτήσεις της πλεύσης.

3.3 Βασικά Στοιχεία και Τεχνολογίες Υποστήριξης

Η αποτελεσματικότητα ενός υβριδικού συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα επιμέρους δομικά του στοιχεία και τις τεχνολογίες που το υποστηρίζουν.

3.3.1 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems – ESS)

Ο ESS αποτελεί την «καρδιά» ενός υβριδικού πλοίου. Η επιλογή της τεχνολογίας εξαρτάται από το προφίλ λειτουργίας (Operational Profile):

- **Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion):** Αποτελούν την επικρατέστερη λύση λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Η ανάλυση πρέπει να εστιάζει στο **Battery Management System (BMS)**, το οποίο επιτηρεί την τάση, τη θερμοκρασία και την κατάσταση φόρτισης (State of Charge - SoC), διασφαλίζοντας την αποφυγή θερμικής διαφυγής (thermal runaway).
- **Υπερπυκνωτές (Supercapacitors):** Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές προσφέρουν τεράστια ισχύ σε πολύ μικρό χρόνο. Είναι ιδανικοί για την κάλυψη στιγμιαίων αιχμών φορτίου (transient loads) που προκαλούνται από τη λειτουργία γερανών ή thrusters.
- **Συστήματα Flywheels (Σφόνδυλοι):** Χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά, κυρίως σε εξειδικευμένα πλοία, αποθηκεύοντας ενέργεια με τη μορφή κινητικής ενέργειας σε έναν περιστρεφόμενο δίσκο.

3.3.2 Ηλεκτρικές Μηχανές και Ηλεκτρονικά Ισχύος

Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν το βασικό μέσο μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ισχύ. Η χρήση σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος επιτρέπει ακριβή έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας, βελτιώνοντας τη δυναμική απόκριση του συστήματος πρόωσης και μειώνοντας τις απώλειες. Η χρήση των Variable Frequency Drives (VFD) επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των ηλεκτροκινητήρων. Ρυθμίζοντας τη συχνότητα του ρεύματος, μπορούμε να ελέγξουμε τις στροφές της προπέλας με τεράστια ακρίβεια, μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας που παρατηρούνται στα παραδοσιακά συστήματα με μειωτήρες και σταθερές στροφές.

3.3.3 Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας

Για να επιτευχθεί η μέγιστη εξοικονόμηση καυσίμου, το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System) εκτελεί τις εξής λειτουργίες:

- **Peak Shaving (Εξομάλυνση Αιχμών):** Όταν οι ανάγκες σε ισχύ αυξάνονται απότομα (π.χ. σε κακές καιρικές συνθήκες), το πλεόνασμα ενέργειας παρέχεται από τις μπαταρίες αντί να αναγκαστεί μια επιπλέον γεννήτρια να τεθεί σε λειτουργία.
- **Load Following / Strategic Loading:** Το σύστημα φορτίζει τις μπαταρίες όταν οι κύριες μηχανές λειτουργούν σε χαμηλό φορτίο (εκεί όπου η κατανάλωση ανά παραγόμενη kWh είναι υψηλή), αυξάνοντας τεχνητά το φορτίο τους ώστε να λειτουργούν πιο αποδοτικά.
- **Spinning Reserve:** Οι μπαταρίες λειτουργούν ως «εφεδρεία». Αν μια γεννήτρια παρουσιάσει βλάβη, οι μπαταρίες παρέχουν ακαριαία ισχύ, αποτρέποντας ένα ολικό Blackout, κάτι κρίσιμο για την ασφάλεια (π.χ. σε κρουαζιερόπλοια ή πλοία μεταφοράς προσωπικού).

3.4 Παραδείγματα Εφαρμογών στη Διεθνή Ναυτιλία

Η εφαρμογή υβριδικών συστημάτων πρόωσης στη ναυτιλία έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία, καθώς οι ναυτιλιακές εταιρείες επιδιώκουν τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων και τη συμμόρφωση με τους διεθνείς κανονισμούς περιορισμού εκπομπών αερίων ρύπων. Η ανάπτυξη τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης, η βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας των συσσωρευτών και η εξέλιξη των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας έχουν καταστήσει εφικτή την ευρεία εφαρμογή υβριδικών αρχιτεκτονικών σε διαφορετικούς τύπους πλοίων. Οι υβριδικές τεχνολογίες έχουν εφαρμοστεί κυρίως σε πλοία με μεταβαλλόμενο προφίλ λειτουργίας, όπου παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις στη ζήτηση ισχύος. Τέτοιες κατηγορίες πλοίων είναι τα επιβατηγά πλοία μικρών αποστάσεων, τα ρυμουλκά, τα πλοία υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων και τα ερευνητικά σκάφη. Στις εφαρμογές αυτές η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει την εξομάλυνση των φορτίων πρόωσης και τη μείωση της λειτουργίας των μηχανών εσωτερικής καύσης σε μη αποδοτικά επίπεδα φορτίου.

Ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα υβριδικής πρόωσης αποτελεί το επιβατηγό πλοίο Ampere, το οποίο λειτουργεί στη Νορβηγία και θεωρείται Ένα από τα πρώτα πλήρως ηλεκτρικά ferry μεγάλης κλίμακας. Το πλοίο διαθέτει συστοιχίες μπαταριών συνολικής ενεργειακής χωρητικότητας περίπου 1 MWh και χρησιμοποιεί ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης ισχύος περίπου 450 kW έκαστος. Η χρήση ηλεκτρικής πρόωσης σε συνδυασμό με συστήματα φόρτισης στα λιμάνια έχει οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης

καυσίμου κατά περίπου 80% σε σύγκριση με συμβατικά πλοία της ίδιας κατηγορίας.



Σχήμα 4: *MF Ampere*, <https://corvusenergy.com>

Σύμφωνα με τα τεχνικά στοιχεία του ναυπηγείου (Fjellstrand AS, 2014) το πλοίο Ampere (επίσημα MF Ampere) είναι το πρώτο πλήρως ηλεκτρικό οχηματαγωγό (ferry) στον κόσμο, το οποίο αποτελεί ορόσημο για την πράσινη ναυτιλία.

Βασικά Χαρακτηριστικά

- Τύπος: Επιβατηγό/Οχηματαγωγό (Ro-Ro Passenger Ship).
- Καινοτομία: Λειτουργεί αποκλειστικά με μπαταρίες, χωρίς τη χρήση ορυκτών καυσίμων, μειώνοντας τις εκπομπές κατά 95% και το λειτουργικό κόστος κατά 80%.
- Ιστορικό: Κατασκευάστηκε το 2014 στο ναυπηγείο Fjellstrand της Νορβηγίας και τέθηκε σε λειτουργία το 2015.
- Διαδρομή: Εκτελεί το δρομολόγιο Lavik – Orpedal στη Νορβηγία για λογαριασμό της εταιρείας Norled.

Αντίστοιχα, σημαντικές εφαρμογές υβριδικής πρόωσης έχουν αναπτυχθεί σε ρυμουλκά λιμενικών εργασιών. Τα υβριδικά ρυμουλκά της σειράς Eddy Tug, που αναπτύχθηκαν από το (Holland Shipyards Group, 2018), αποτελούν μια

καινοτόμο σειρά σκαφών που συνδυάζουν υψηλή απόδοση, ασφάλεια και χαμηλή κατανάλωση καυσίμου μέσω ενός υβριδικού συστήματος πρόωσης.

Κύρια Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού:

- Υδροδυναμική Γάστρα: Διαθέτουν μια ιδιαίτερα λεπτή γάστρα τύπου "κανό" που μειώνει την αντίσταση κατά 30%, επιτρέποντας υψηλότερες ταχύτητες διέλευσης και εξοικονόμηση καυσίμου.
- Διάταξη Προωστήρων: Οι προωστήρες είναι τοποθετημένοι στην κεντρική γραμμή (ένας εμπρός και ένας πίσω από την καρίνα), προσφέροντας εξαιρετική ευστάθεια και δυνατότητα άμεσης παροχής ώθησης προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

Το σύστημα είναι τύπου diesel-direct / diesel-electric, το οποίο αποτελεί πλέον πρότυπο για τη σειρά:

- Diesel-Electric Mode: Για πλεύση και ελιγμούς ακριβείας με ταχύτητες έως 10-11 κόμβους, χρησιμοποιούνται μόνο οι ηλεκτροκινητήρες, μειώνοντας δραστικά το κόστος συντήρησης και καυσίμου.
- Diesel-Direct Mode: Οι κύριοι πετρελαιοκινητήρες (συνήθως Mitsubishi) ενεργοποιούνται μόνο όταν απαιτείται η μέγιστη ελκτική δύναμη (bollard pull).
- Boost Mode: Συνδυασμός και των δύο πηγών ενέργειας για την επίτευξη της μέγιστης ισχύος.

Σημαντική εφαρμογή υβριδικής αρχιτεκτονικής παρατηρείται επίσης σε πλοία υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων (Offshore Support Vessels). Τα πλοία αυτά χρησιμοποιούν συνήθως συστήματα υβριδικής πρόωσης τύπου diesel-electric σε συνδυασμό με συστοιχίες μπαταριών. Η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει τη λειτουργία του πλοίου σε κατάσταση δυναμικής τοποθέτησης (Dynamic Positioning) χωρίς την ανάγκη λειτουργίας πολλαπλών γεννητριών, μειώνοντας σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί το πλοίο Viking Lady, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως πλατφόρμα δοκιμών για υβριδικά ενεργειακά συστήματα στη ναυτιλία. Το πλοίο είναι εξοπλισμένο με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και κυψέλες καυσίμου, ενώ η ενεργειακή διαχείριση πραγματοποιείται μέσω ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των γεννητριών και των ηλεκτροκινητήρων πρόωσης.



Σχήμα 5: Viking Lady, <https://eidesvik.no/vessels/viking-lady>

Το Viking Lady όπως αναφέρεται στην επίσημη παρουσίαση της πλοιοκτήτριας εταιρείας (Eidesvik Offshore, 2020) είναι ένα πρωτοποριακό σκάφος υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων (Offshore Supply Vessel - OSV), το οποίο έγινε παγκοσμίως γνωστό ως ένα από τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον εμπορικά πλοία.

Ανήκει στη νορβηγική εταιρεία [Eidesvik Offshore](https://eidesvik.no) και αποτελεί ορόσημο για τη ναυτιλιακή τεχνολογία λόγω της χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας.

Βασικά Χαρακτηριστικά & Καινοτομίες

- **Πρώτο Υβριδικό Πλοίο:** Θεωρείται το πρώτο εμπορικό πλοίο που χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου (fuel cells) προσαρμοσμένες για θαλάσσια χρήση, καθώς και σύστημα μπαταριών (Lithium-ion) για υβριδική κίνηση.
- **Καύσιμο LNG:** Λειτουργεί κυρίως με υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), το οποίο μειώνει δραστικά τις εκπομπές CO₂, NO_x και SO_x.
- **Ελληνική Σχεδίαση:** Το πλοίο έχει «ελληνική σφραγίδα», καθώς το τμήμα Έρευνας και Καινοτομίας του νορβηγικού νηογνώμονα (DNV) στην Ελλάδα συμμετείχε ενεργά στον σχεδιασμό του.

Η τεχνική αξιολόγηση των εφαρμογών αυτών καταδεικνύει ότι τα υβριδικά συστήματα μπορούν να προσφέρουν σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει τη μείωση των αιχμών φορτίου και την αποφυγή λειτουργίας των μηχανών σε χαμηλά φορτία, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Παράλληλα, η δυνατότητα λειτουργίας σε αμιγώς ηλεκτρική

κατάσταση σε λιμένες συμβάλλει στη σημαντική μείωση των τοπικών εκπομπών ρύπων και του θορύβου. Τα παραδείγματα αυτά καταδεικνύουν ότι η υβριδική πρόωση δεν αποτελεί πλέον πειραματική τεχνολογία, αλλά εφαρμόζεται ήδη σε ευρύ φάσμα εμπορικών και ειδικών πλοίων. Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και ηλεκτρικής πρόωσης αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τη χρήση υβριδικών συστημάτων στη ναυτιλία κατά τις επόμενες δεκαετίες.

Κεφάλαιο 4 - Ανάλυση Πλεονεκτημάτων και Μειονεκτημάτων Υβριδικών Συστημάτων Πρόωσης και Ενέργειας

Η αυξανόμενη πίεση για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων ρύπων στη ναυτιλία έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση και ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων πρόωσης και ενέργειας. Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν συμβατικές και εναλλακτικές πηγές ενέργειας, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία λειτουργίας και δυνατότητα βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης. Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται συστηματική ανάλυση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των υβριδικών συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια, καθώς και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή τους.

4.1 Τεχνική Αξιολόγηση

Η τεχνική αξιολόγηση των υβριδικών συστημάτων πρόωσης βασίζεται στην ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς του συνολικού συστήματος και στη δυνατότητα βελτιστοποίησης της λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων. Σε ένα συμβατικό σύστημα πρόωσης, η μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργεί σε ευρύ φάσμα φορτίων, με αποτέλεσμα τη σημαντική απόκλιση από το σημείο μέγιστης θερμικής απόδοσης. Η λειτουργία αυτή οδηγεί σε αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και σε μειωμένη συνολική ενεργειακή απόδοση.(Geertsma et al., 2017). Στα υβριδικά συστήματα, η ενσωμάτωση ηλεκτρικών υποσυστημάτων επιτρέπει την αποσύνδεση της παραγωγής ισχύος από την άμεση ζήτηση πρόωσης. Η απόδοση της μηχανής μπορεί να εκφραστεί μέσω της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, η οποία εξαρτάται από το φορτίο λειτουργίας. Η δυνατότητα διατήρησης της μηχανής σε σταθερό εύρος φορτίου υψηλής απόδοσης αποτελεί βασικό τεχνικό πλεονέκτημα των υβριδικών διατάξεων (Boveri et al., 2023).

Η συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος πρόωσης μπορεί να προσεγγιστεί ως συνάρτηση των επιμέρους αποδόσεων των υποσυστημάτων μετατροπής ενέργειας. Στην περίπτωση υβριδικών συστημάτων, η ενεργειακή αλυσίδα περιλαμβάνει τη μηχανή εσωτερικής καύσης, τη γεννήτρια, τα ηλεκτρονικά ισχύος και τον ηλεκτροκινητήρα πρόωσης. Οι τυπικές τιμές απόδοσης των επιμέρους στοιχείων κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, με τους ηλεκτροκινητήρες να παρουσιάζουν αποδόσεις μεγαλύτερες του 95% και τους μετατροπείς ισχύος αποδόσεις έως 99% (Banaei et al., 2023).

Η τεχνική λειτουργία των υβριδικών συστημάτων βασίζεται σε τρεις κύριες λειτουργικές καταστάσεις (Operational Modes) (Kalikatzarakis et al., 2022):

- **Diesel Mode:** Η πρόωση καλύπτεται αποκλειστικά από τη μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία λειτουργεί σε σταθερό φορτίο.
- **Hybrid/Boost Mode:** Η πρόωση υποστηρίζεται από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο παρέχει επιπλέον ισχύ κατά τη διάρκεια αιχμών φορτίου.
- **Electric Mode:** Το πλοίο λειτουργεί σε αμιγώς ηλεκτρική κατάσταση, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια ελιγμών σε λιμένες ή σε περιβάλλοντα με αυστηρούς περιορισμούς εκπομπών.

Κρίσιμο τεχνικό χαρακτηριστικό αποτελεί η λειτουργία εξομάλυνσης αιχμών φορτίου (Peak Shaving). Σε συνθήκες απότομης αύξησης της ζήτησης ισχύος, όπως κατά τη λειτουργία προωθητήρων ή σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας παρέχει την απαιτούμενη ισχύ, αποτρέποντας την ενεργοποίηση πρόσθετων γεννητριών (Zhu et al., 2022). Η λειτουργία αυτή μειώνει τον αριθμό εκκινήσεων των μηχανών, περιορίζει τη μηχανική καταπόνηση και βελτιώνει τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

Από κατασκευαστικής πλευράς, τα υβριδικά συστήματα απαιτούν την ενσωμάτωση εξειδικευμένων υποσυστημάτων. Οι συστοιχίες μπαταριών τοποθετούνται σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους με συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας και πυρόσβεσης. Η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 120 και 250 Wh/kg, ενώ η λειτουργία τους ελέγχεται από σύστημα διαχείρισης μπαταριών που παρακολουθεί την κατάσταση φόρτισης και τις θερμοκρασιακές συνθήκες (Inal & Deniz, 2021). Παράλληλα, τα ηλεκτρονικά ισχύος και τα συστήματα μετατροπής ενέργειας απαιτούν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας και προστασίας από διακυμάνσεις τάσης και φορτίου. Η χρήση συστημάτων ελέγχου πραγματικού χρόνου είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας και της βέλτιστης κατανομής ισχύος μεταξύ των πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής των υβριδικών συστημάτων συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις σχεδιασμού και λειτουργίας.

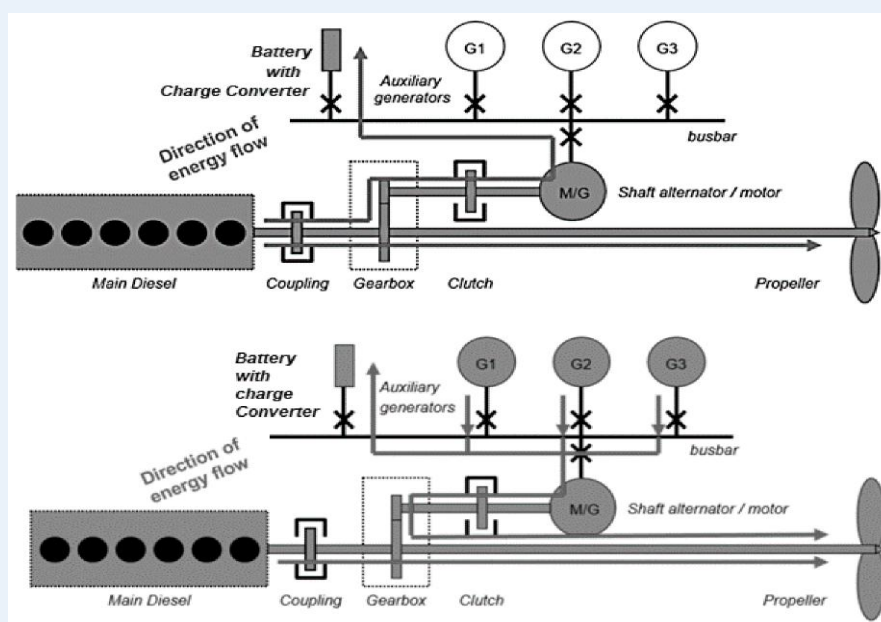
Η ανάγκη συντονισμού πολλαπλών πηγών ενέργειας και η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης καθιστούν απαραίτητη τη χρήση προηγμένων συστημάτων αυτοματισμού και εξειδικευμένης τεχνικής κατάρτισης του

πληρώματος. Επιπλέον, ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με τη θερμική διαχείριση των συσσωρευτών και τον κίνδυνο θερμικής διαφυγής απαιτούν την εφαρμογή αυστηρών τεχνικών προδιαγραφών (DNV, 2022).

Συνολικά, η τεχνική αξιολόγηση των υβριδικών συστημάτων πρόωσης καταδεικνύει ότι η ενσωμάτωση ηλεκτρικών και ενεργειακών τεχνολογιών οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, υπό την προϋπόθεση ότι η αρχιτεκτονική του συστήματος έχει σχεδιαστεί με βάση τις λειτουργικές απαιτήσεις του πλοίου.

Πίνακας 1: Συγκριτική Τεχνική Αξιολόγηση Συστημάτων

Παράμετρος	Συμβατικό Σύστημα	Υβριδικό Σύστημα
Εύρος Λειτουργίας	20 – 100%	60 – 90% (βελτιστοποιημένο)
Εκκινήσεις Μηχανών	Συχνές	Μειωμένες
Peak Load Handling	Συχνές	Μέσω μπαταριών
Φθορά Εξοπλισμού	Μέσω νέας γεννήτριας	Μειωμένη
Απόδοση Κινητήρα	40-45%	Έως 50% συνολικά



Σχήμα 6: Διάταξη υβριδικού συστήματος πρόωσης με λειτουργίες PTO και PTL. Chin et al. (2022)

4.2 Περιβαλλοντική Αξιολόγηση

Η περιβαλλοντική αξιολόγηση των υβριδικών συστημάτων δεν περιορίζεται στη γενική μείωση καυσίμου, αλλά εξετάζει τη συμμόρφωση του πλοίου με τους διεθνείς κανονισμούς του IMO (MARPOL Annex VI) και τους δείκτες ενεργειακής έντασης EEDI (Energy Efficiency Design Index) και CII (Carbon Intensity Indicator).

4.2.1 Μείωση Αέριων Ρύπων και Σωματιδίων

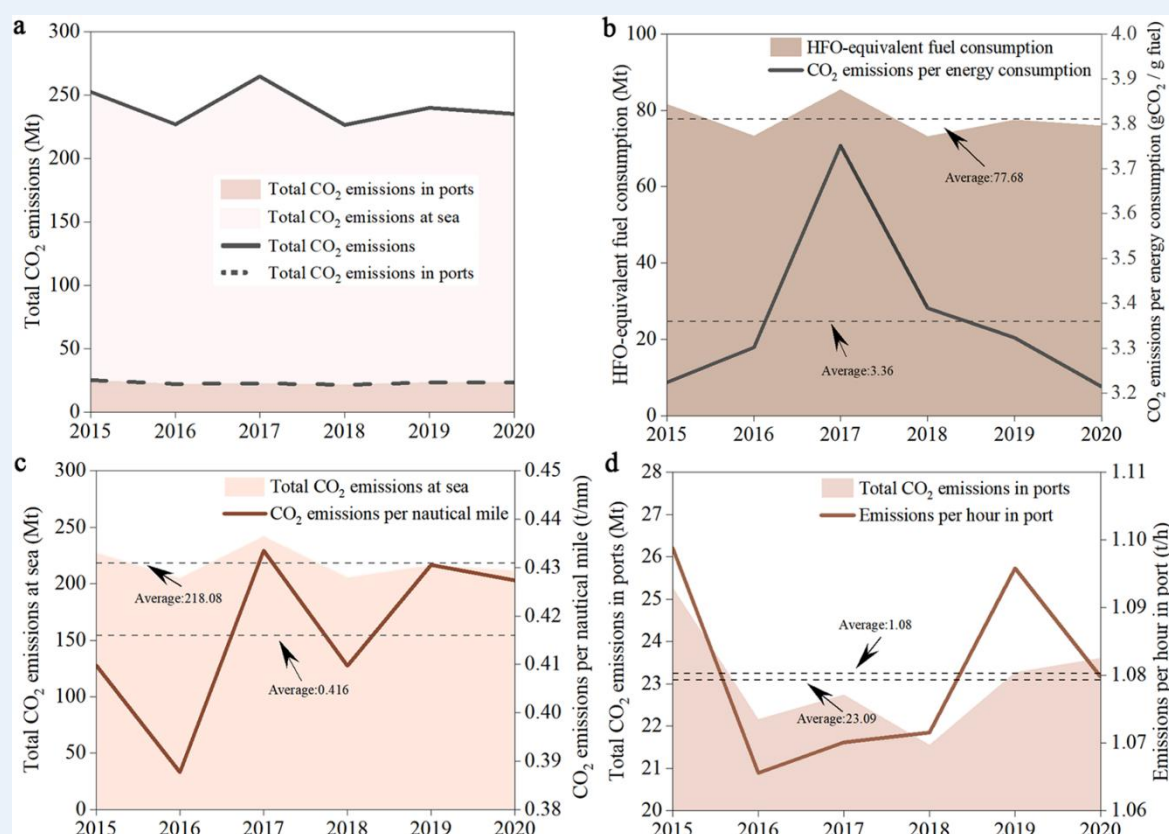
Η χρήση ηλεκτρικής πρόωσης (Zero-Emission Mode) εντός των περιοχών ελέγχου εκπομπών (ECA - Emission Control Areas) εξαλείφει τις τοπικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x). Τεχνικά, η μείωση των NO_x επιτυγχάνεται επειδή οι ηλεκτροκινητήρες αντικαθιστούν τη λειτουργία των MEK σε χαμηλά φορτία, όπου οι θερμοκρασίες καύσης δεν είναι βέλτιστες, οδηγώντας σε ατελή καύση και αυξημένα σωματίδια (PM) (Inal & Deniz, 2021).

4.2.2 Ποσοτική Ανάλυση Εκπομπών

Ειδικότερα, η μελέτη των Inal & Deniz (2021) σε ηλεκτρικά και υβριδικά πλοία αποδεικνύει ότι η χρήση μπαταριών για την κάλυψη των φορτίων αιχμής και της παραμονής στο λιμάνι μπορεί να μειώσει τις εκπομπές NO_x έως και 90%. Παράλληλα, οι Banaei et al. (2023) καταγράφουν ότι η βελτιστοποίηση του σημείου λειτουργίας των μηχανών μέσω υβριδικών αρχιτεκτονικών επιφέρει συνολική μείωση του CO₂ κατά 15% έως 30%, ανάλογα με το επιχειρησιακό προφίλ του σκάφους.

Πίνακας 2: Τεχνική Σύγκριση Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος βάσει Βιβλιογραφικών Δεδομένων

Ρύπος / Παράμετρος	Συμβατική Πρόωση	Υβριδική Πρόωση	Ποσοστό Μείωσης
Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂)	Βάσει κατανάλωσης	Βελτιστοποιημένη καύση	15% - 30%
Οξείδια του Αζώτου (NO _x)	Tier II / III Standards	Tier III+ (Electric Mode)	έως 90% (σε λιμένα)
Σωματίδια (PM)	Υψηλά σε χαμηλό φορτίο	Ελάχιστα (Battery Load)	40% - 60%
Ηχητική Ρύπανση (Noise)	100-110 dB	< 70 dB (Electric)	Σημαντική μείωση



Σχήμα 7: Liu, W. et al.2025. Ανάλυση της δυναμικής των εκπομπών άνθρακα βάσει δεδομένων υπό συνθήκες συμφόρησης πλοίων σε λιμένες. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), 812.

Στο σχήμα 7 βλέπουμε την ανάλυση τάσεων εκπομπών CO₂ και κατανάλωσης καυσίμου στην παγκόσμια ναυτιλία (2015-2020). Τα δεδομένα καταδεικνύουν τη σταθερή επιβάρυνση στους λιμένες (γραφήματα a, d), η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά με την υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων "Zero-Emission Port Stay". Η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ανά ναυτικό μίλι (γράφημα c) αποτελεί τον κύριο στόχο των υβριδικών αρχιτεκτονικών για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς του IMO.

Περιβαλλοντική Αξιολόγηση: Πέρα από τη βελτίωση της SFOC, τα υβριδικά συστήματα λειτουργούν ως μεταβατική τεχνολογία που διευκολύνει την εισαγωγή εναλλακτικών καυσίμων χαμηλού άνθρακα, ενισχύοντας τη συνολική προσπάθεια για την πλήρη απανθρακοποίηση του κλάδου (Ναυτικά Χρονικά, 2022).

4.3 Οικονομική Ανάλυση και Βιωσιμότητα της Επένδυσης

Από οικονομικής πλευράς, τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζουν ένα μείγμα πλεονεκτημάτων και προκλήσεων. Το αρχικό κόστος επένδυσης (CAPEX) είναι συνήθως υψηλότερο κατά 15% έως 25% σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα, λόγω του κόστους των συσσωρευτών, των ηλεκτροκινητήρων και των προηγμένων συστημάτων ελέγχου (Banaei et al., 2023). Ωστόσο, το αυξημένο κεφαλαιουχικό κόστος αντισταθμίζεται από τη δραστική μείωση του λειτουργικού κόστους (OPEX). Η εξοικονομημένη ενέργεια, η μείωση των εξόδων συντήρησης και η αποφυγή περιβαλλοντικών προστίμων βελτιώνουν τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης (Geertsma et al., 2017). Επιπλέον, τα «πράσινα» πλοία απολαμβάνουν μειωμένα λιμενικά τέλη (Green Award) ή προνομιακή πρόσβαση σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες ζώνες.

Η οικονομική αποδοτικότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του πλοίου, το λειτουργικό του προφίλ και τη διάρκεια ζωής της επένδυσης. Για πλοία με συχνές στάσεις και μεταβαλλόμενα φορτία, ο χρόνος απόσβεσης μπορεί να είναι σχετικά σύντομος. Αντίθετα, για πλοία μεγάλων αποστάσεων με σταθερή ταχύτητα, τα οικονομικά οφέλη είναι περιορισμένα. Η εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος πρόωσης απαιτεί σημαντική αρχική επένδυση, η οποία υπερβαίνει κατά πολύ το κόστος ενός συμβατικού συστήματος ντίζελ. Το κεφαλαιακό αυτό κόστος (Capital Expenditure - CAPEX) αναλύεται στους εξής άξονες:

- **Κόστος Συστοιχιών Μπαταριών:** Αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης. Παρά τη μείωση των τιμών τα τελευταία έτη, οι μπαταρίες

ναυτιλιακού τύπου (marine grade) παραμένουν ακριβές λόγω των αυστηρών προδιαγραφών ασφαλείας και πυρόσβεσης.

- **Ηλεκτρονικά Ισχύος και Μετατροπείς (Inverters/Converters):** Η ανάγκη για εξελιγμένα συστήματα VFD (Variable Frequency Drives) και DC-grids αυξάνει το κόστος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.
- **Μετασκευή (Retrofitting) vs Νέα Ναυπήγηση:** Στην περίπτωση υφιστάμενων πλοίων, το κόστος αυξάνεται λόγω των αναγκαίων δομικών αλλαγών για τη χωροθέτηση των μπαταριών και των συστημάτων ψύξης.

4.3.1 Ανάλυση Λειτουργικού Κόστους (OPEX) και Εξοικονόμηση

Το κύριο οικονομικό κίνητρο είναι η βελτιστοποίηση των λειτουργικών εξόδων μέσω των εξής μηχανισμών:

- **Μείωση Κατανάλωσης Καυσίμου:** Μέσω της λειτουργίας Peak Shaving, οι μηχανές λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο απόδοσης (Sweet Spot), αποφεύγοντας την περιττή κατανάλωση κατά τις εναλλαγές φορτίου, γεγονός που οδηγεί σε εξοικονόμηση καυσίμου από 10% έως 30% ανάλογα με το δρομολόγιο (Inal & Deniz, 2021).
- **Μείωση Κόστους Συντήρησης:** Η χρήση μπαταριών επιτρέπει στις γεννήτριες να λειτουργούν λιγότερες ώρες ετησίως. Αυτό επιμηκύνει τα διαστήματα μεταξύ των γενικών επισκευών (Overhaul intervals) και μειώνει το κόστος ανταλλακτικών και εργατικών (Kalikatzarakis et al., 2022).
- **Zero-Emission Port Stay:** Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης στα λιμάνια μηδενίζει τη χρήση ακριβών καυσίμων χαμηλού θείου (MGO) και μειώνει την εξάρτηση από τις βοηθητικές μηχανές (Boveri et al., 2023).

4.3.2 Η Επίδραση του EU ETS και του Carbon Pricing

Μια σύγχρονη οικονομική ανάλυση οφείλει να ενσωματώνει το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της Ε.Ε. (EU ETS), το οποίο άλλαξε ριζικά τα δεδομένα από το 2024.

- **Κόστος Ρύπων:** Οι ναυτιλιακές εταιρείες υποχρεούνται πλέον να αγοράζουν δικαιώματα εκπομπών για το CO₂ που εκλύουν. Ένα υβριδικό πλοίο που μειώνει τις εκπομπές του κατά 20%, εξοικονομεί άμεσα κεφάλαια από τη μη αγορά αυτών των δικαιωμάτων, βελτιώνοντας την ταμειακή ροή (cash flow) της εταιρείας (IMO, 2023).

- **Δείκτης CII (Carbon Intensity Indicator):** Η υβριδική τεχνολογία βοηθά το πλοίο να διατηρεί υψηλή βαθμολογία (A ή B), αποφεύγοντας την εμπορική υποτίμηση του πλοίου στη δευτερογενή αγορά (Asset Value protection) (Lindstad et al., 2021).

4.3.3 Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period) και ROI

Η περίοδος απόσβεσης (Payback Period) μιας υβριδικής επένδυσης αποτελεί τον κρίσιμο δείκτη για τη λήψη της επενδυτικής απόφασης και υπολογίζεται ως το πηλίκο του πρόσθετου κεφαλαιουχικού κόστους (Extra CAPEX) προς την ετήσια καθαρή εξοικονομημένη ταμιακή ροή από τη μείωση του λειτουργικού κόστους (ΔΟΡΕΧ).

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και τις τρέχουσες ναυτιλιακές μελέτες, η περίοδος αυτή δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- **Προφίλ Λειτουργίας (Operational Profile):** Η απόσβεση επιτυγχάνεται ταχύτερα σε πλοία με έντονα μεταβαλλόμενα φορτία. Μελέτες σε πλοία τύπου Ferries και ρυμουλκά (Tugs) δείχνουν ότι η περίοδος απόσβεσης κυμαίνεται μεταξύ 4 και 6 ετών, καθώς η εξοικονόμηση καυσίμου μπορεί να αγγίξει το 20-30% σε συνθήκες λιμένος (Boveri et al., 2023; Geertsma et al., 2017). Αντίθετα, σε πλοία ανοικτής θαλάσσης με σταθερή ταχύτητα, ο χρόνος απόσβεσης επιμηκύνεται λόγω της μικρότερης σχετικής εξοικονόμησης.
- **Μεταβλητότητα Τιμής Καυσίμων:** Η οικονομική βιωσιμότητα των υβριδικών συστημάτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το κόστος των καυσίμων (VLSFO/MGO). Η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει ότι σε περιβάλλον υψηλών τιμών ενέργειας, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) της επένδυσης αυξάνεται σημαντικά, επιταχύνοντας το Break-even point (Inal & Deniz, 2021).
- **Χρηματοδοτικά Εργαλεία και Επιδότησεις:** Η κεφαλαιουχική επιβάρυνση μπορεί να μετριαστεί μέσω διεθνών και εθνικών προγραμμάτων στήριξης της "πράσινης" μετάβασης (π.χ. EU Green Deal, Innovation Fund). Στατιστικά δεδομένα από ευρωπαϊκά προγράμματα καταδεικνύουν ότι οι επιχορηγήσεις μπορούν να καλύψουν έως και το 30% του πρόσθετου CAPEX για καινοτόμες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών, καθιστώντας την επένδυση ελκυστική για τους πλοιοκτήτες (IMO, 2023; Lindstad et al., 2021).

Πίνακας 3: Συγκριτική Οικονομική Αξιολόγηση Συμβατικών και Υβριδικών Συστημάτων Πρόωσης

Δείκτης Οικονομικής Αξιολόγησης	Συμβατικό Σύστημα	Υβριδικό Σύστημα	Πηγή Τεκμηρίωσης
Αρχικό Κεφάλαιο (CAPEX)	Βασικό	+15% έως 25%	Banaei et al. (2023)
Ετήσιο Λειτουργικό Κόστος (OPEX)	Υψηλό (λόγω καυσίμου)	Μειωμένο κατά 15-20%	Kalikatzarakis et al. (2022)
Κόστος Συντήρησης	Σταθερό	Μειωμένο (Running hours)	Geertsma et al. (2017)
Περίοδος Απόσβεσης (Payback)	-	4 - 8 έτη (μέσος όρος)	Inal & Deniz (2021)

Συγκριτική Ανάλυση Απόδοσης Επένδυσης (ROI)

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3, η υβριδική επένδυση παρουσιάζει υψηλότερο αρχικό κόστος, το οποίο όμως εξισορροπείται από τη μακροπρόθεσμη μείωση των δαπανών. Η οικονομική βιωσιμότητα τέτοιων επενδύσεων επιβεβαιώνεται και από εγχώριες μελέτες στην ελληνική ακτοπλοΐα, όπου η ανάλυση κόστους-οφέλους αναδεικνύει την υβριδοποίηση ως την πλέον αποδοτική λύση για πλοία με συχνές προσεγγίσεις σε λιμένες (Παπαδόπουλος, 2020).

4.3.4 Ποσοτική Ανάλυση Οφέλους και Τεκμηρίωση Δεδομένων

Για την αξιολόγηση της επένδυσης, λαμβάνεται ως πλοίο αναφοράς (Baseline) ένα τυπικό Feeder Container ή Ferry με ετήσια κατανάλωση 3.000 τόνων καυσίμου VLSFO. Οι υπολογισμοί βασίζονται στις τεχνικές παραδοχές που ορίζονται από τη διεθνή βιβλιογραφία για υβριδικές μετασκευές (retrofitting).

A. Μείωση Κατανάλωσης Καυσίμου

Η εκτιμώμενη μείωση κατά 13,3% (400 τόνοι ετησίως) προκύπτει από τον συνδυασμό δύο παραγόντων:

1. **Peak Shaving & Strategic Loading:** Η εξάλειψη των αιχμών φορτίου επιτρέπει στις μηχανές να λειτουργούν στο σημείο ελάχιστης ειδικής κατανάλωσης ($SFOC_{\min}$). Η βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι η αποφυγή λειτουργίας σε χαμηλά φορτία (κάτω του 40% MCR) εξοικονομεί κατά μέσο όρο 10-15% καυσίμου ανάλογα με το λειτουργικό προφίλ.
2. **Zero-Emission Port Stay:** Η χρήση μπαταριών για τα ξενοδοχειακά φορτία (hotel loads) στο λιμάνι αντικαθιστά τη λειτουργία των ηλεκτρογεννητριών, οι οποίες έχουν υψηλή ειδική κατανάλωση σε στάση.

B. Μείωση Εκπομπών Ρύπων CO₂

Η μείωση των 1.200 τόνων CO₂ προκύπτει από τον μαθηματικό τύπο του IMO για τις εκπομπές:

$$Emission_{CO_2} = Fuel\ Consumption \times Cf$$

Όπου Cf ο συντελεστής εκπομπών για το καύσιμο VLSFO (ίσος με 3,114 tCO₂ / tFuel).

- **Αρχικές Εκπομπές (Baseline):** 3.000 tFuel × 3,114 = 9.342 tCO₂ ετησίως
- **Νέες Εκπομπές (Post-Hybrid):** 2.600 tFuel × 3,114 = 8.096 tCO₂ ετησίως
- **Καθαρή Μείωση:** 9.342 - 8.096 = 1.246 tCO₂ ≈ 1.200 tCO₂

Αυτή η μείωση της τάξης του 13,3% στον αριθμητή του δείκτη CII (gCO₂ / dwt • nm) επιτρέπει τη μετακίνηση του πλοίου από την κατηγορία "D" (οριακά αποδεκτή/μη αποδεκτή) στην κατηγορία "B" (αποδοτική).

Γ. Κόστος Συντήρησης (Maintenance)

Η μείωση των εξόδων συντήρησης κατά 15% τεκμηριώνεται από τον περιορισμό των ωρών λειτουργίας (Running Hours) των βοηθητικών μηχανών.

- Με βάση το προφίλ λειτουργίας, το σύστημα ESS αναλαμβάνει το φορτίο για περίπου 2.000 ώρες/έτος (λειτουργία σε λιμάνι και αναμονή).
- Εφόσον τα διαστήματα γενικής επισκευής (overhaul) ορίζονται από τις ώρες λειτουργίας, η μείωση αυτή μεταθέτει χρονικά το κόστος των ανταλλακτικών και των εργατικών, μειώνοντας το ετήσιο αποθεματικό συντήρησης κατά το προαναφερθέν ποσοστό.

Απλή Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period):

$$PBP = \frac{CAPEX}{Annual Benefit} = \frac{1.200.00}{356.000} \text{ περίπου ίσο με } 3,37 \text{ έτη}$$

Η περίοδος αυτή θεωρείται εξαιρετικά ελκυστική για τη ναυτιλιακή βιομηχανία, καθώς οι περισσότερες πράσινες επενδύσεις έχουν ορίζοντα απόσβεσης τα 5-8 έτη.

4.4 Προβλήματα και Προκλήσεις

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η εφαρμογή υβριδικών συστημάτων πρόωσης συνοδεύεται από σειρά τεχνικών και κανονιστικών προκλήσεων που απαιτούν προσεκτική διαχείριση.

4.4.1 Ασφάλεια και Θερμική Ευστάθεια

Το κρισιμότερο ζήτημα αφορά την ασφάλεια των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS). Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου ενέχουν τον κίνδυνο της θερμικής διαφυγής (Thermal Runaway), η οποία μπορεί να προκληθεί από βραχυκύκλωμα, υπερφόρτιση ή μηχανική βλάβη. Σε ένα απαιτητικό ναυτικό περιβάλλον με κραδασμούς και υψηλή υγρασία, η αξιοπιστία των συστημάτων ψύξης και των αισθητήρων του Battery Management System (BMS) είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή πυρκαγιών που είναι δύσκολο να κατασβεστούν με συμβατικά μέσα (DNV, 2022).

4.4.2 Κανονιστικό Πλαίσιο και Πιστοποίηση

Η έλλειψη πλήρως εναρμονισμένων διεθνών τεχνικών προτύπων δυσχεραίνει τον σχεδιασμό. Αν και ο IMO έχει θεσπίσει τους δείκτες EEDI, EEXI και CII, οι κανονισμοί αυτοί εστιάζουν στο αποτέλεσμα (μείωση ρύπων) και λιγότερο στις τεχνικές προδιαγραφές των υβριδικών διατάξεων. Η ταχεία τεχνολογική εξέλιξη καθιστά απαραίτητη τη συνεχή αναθεώρηση των κανόνων από τους νηογνώμονες, αυξάνοντας την αβεβαιότητα κατά τη φάση της ναυπήγησης ή μετασκευής (Inal & Deniz, 2021). Παράλληλα, η πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών ισχύος εισάγει νέες προκλήσεις στον τομέα της κυβερνοασφάλειας (Cybersecurity), καθώς τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EMS) είναι πλέον ευάλωτα σε κακόβουλες επιθέσεις που θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια πλεύσης (Isalos.net, 2021).

4.4.3 Ανθρώπινος Παράγοντας και Συντήρηση

Η επιτυχής εφαρμογή των υβριδικών λύσεων εξαρτάται άμεσα από την εκπαίδευση του πληρώματος. Η μετάβαση από τη συμβατική μηχανολογία στην ηλεκτροτεχνία υψηλής τάσης απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις για τη λειτουργία και τη συντήρηση των μετατροπέων και των συσσωρευτών. Η ανάγκη για συνεχή κατάρτιση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς οι λανθασμένοι χειρισμοί μπορούν να οδηγήσουν σε πρόωρη γήρανση των μπαταριών και αύξηση του OPEX (Ναυτικά Χρονικά, 2022).

Κεφάλαιο 5 - Επιλογή Βέλτιστων Υβριδικών Συστημάτων Ανά Τύπο Πλοίου

Η επιλογή του βέλτιστου υβριδικού συστήματος αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία λήψης αποφάσεων, η οποία απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση. Δεν βασίζεται μόνο σε μεμονωμένα τεχνικά χαρακτηριστικά, αλλά στη συνεκτίμηση τεχνικών, λειτουργικών και οικονομικών παραμέτρων σε συνάρτηση με το επιχειρησιακό προφίλ (Operational Profile) του πλοίου.

5.1 Κριτήρια Επιλογής και Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Η διαδικασία επιλογής μπορεί να μοντελοποιηθεί ως πρόβλημα πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπου η βαρύτητα κάθε κριτηρίου μεταβάλλεται ανάλογα με την κατηγορία του πλοίου (Boveri et al., 2023).

5.1.1 Λειτουργικό Προφίλ (Operational Profile)

Αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο. Περιλαμβάνει τη μέση ταχύτητα, τις διακυμάνσεις φορτίου και τον χρόνο παραμονής σε κατάσταση αναμονής (stand-by). Πλοία με έντονα μεταβαλλόμενα φορτία εμφανίζουν σημαντικές απώλειες απόδοσης με συμβατικές ΜΕΚ. Τα υβριδικά συστήματα επιτρέπουν την εξομάλυνση του φορτίου (Load Leveling), διασφαλίζοντας τη λειτουργία των μηχανών στο βέλτιστο σημείο SFOC (Geertsma et al., 2017).

5.1.2 Τεχνική Εφικτότητα και Χωροθέτηση

Η διαθεσιμότητα χώρου και η κατανομή βαρών είναι καθοριστικά, ειδικά σε περιπτώσεις Retrofit. Οι συστοιχίες μπαταριών απαιτούν ειδικά διαμορφωμένους χώρους με συστήματα HVAC για τη διατήρηση της θερμοκρασίας εντός των ορίων ασφαλείας (συνήθως 20-25°C), προκειμένου να μεγιστοποιηθεί ο κύκλος ζωής τους (DNV, 2022).

5.1.3 Κανονιστική Συμμόρφωση (EEXI/CII)

Η συμμόρφωση με τους δείκτες του IMO (EEDI, EEXI) και κυρίως με τον δείκτη έντασης άνθρακα (CII) επηρεάζει πλέον άμεσα την εμπορική αξία του πλοίου. Τα υβριδικά συστήματα προσφέρουν τη δυνατότητα άμεσης βελτίωσης της περιβαλλοντικής κατάταξης, αποτρέποντας την υποβάθμιση του πλοίου σε μη εμπορεύσιμες κατηγορίες (D ή E) (Lindstad et al., 2021).

Όπως επισημαίνεται και σε ελληνικές αναλύσεις, η στρατηγική αυτή είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας του ελληνικού στόλου στην ποντοπόρο ναυτιλία (Isalos.net, 2021).

5.1.4 Οικονομικό Κόστος Κύκλου Ζωής (LCC)

Η ανάλυση επεκτείνεται στο συνολικό Life Cycle Cost, συμπεριλαμβανομένης της αντικατάστασης των συσσωρευτών (συνήθως μετά από 8-10 έτη) και της υπολειμματικής αξίας του εξοπλισμού. Η μελέτη του Παπαδόπουλου (2020) καταδεικνύει ότι για την ελληνική ακτοπλοΐα, το LCC των υβριδικών συστημάτων είναι ευνοϊκότερο των συμβατικών, όταν συνυπολογιστεί η μείωση των ωρών συντήρησης και η εξοικονόμηση καυσίμου.

5.2 Ανάλυση Ανά Τύπο Πλοίου

Η εξειδίκευση της υβριδικής τεχνολογίας απαιτεί την προσαρμογή της αρχιτεκτονικής του συστήματος στις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε ναυτιλιακού κλάδου.

5.2.1 Επιβατηγά Πλοία και Ακτοπλοϊκά Ferries

Τα επιβατηγά πλοία αποτελούν το προνομιακό πεδίο εφαρμογής των υβριδικών συστημάτων λόγω των προκαθορισμένων δρομολογίων και των συχνών ελιγμών. Η υιοθέτηση Plug-in Hybrid διατάξεων επιτρέπει τη φόρτιση των συσσωρευτών από την ξηρά (Cold Ironing), εξαλείφοντας πλήρως τους ρύπους κατά την παραμονή στο λιμάνι.

Όπως επισημαίνει ο Παπαδόπουλος (2020), η χρήση ηλεκτρικής πρόωσης μειώνει τον θόρυβο και τους κραδασμούς, βελτιώνοντας την εμπειρία των επιβατών. Στην Ελλάδα, η σταδιακή αναβάθμιση των λιμενικών υποδομών αναμένεται να επιταχύνει τη μετάβαση σε πλήρως ηλεκτρικές λύσεις για μικρές αποστάσεις (short-sea shipping).

5.2.2 Πλοία Υποστήριξης Υπεράκτιων Εγκαταστάσεων (OSVs)

Στα OSVs, η υβριδοποίηση εστιάζει στην ασφάλεια και την απόκριση κατά τις επιχειρήσεις Dynamic Positioning (DP). Οι συσσωρευτές λειτουργούν ως "Spinning Reserve", επιτρέποντας στο πλοίο να λειτουργεί με λιγότερες γεννήτριες χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια σε περίπτωση αστοχίας μιας μηχανής. Η στρατηγική αυτή μειώνει τις ώρες λειτουργίας των MEK και το OPEX συντήρησης (Kalikatzarakis et al., 2022).

5.2.3 Ρυμουλκά και Πλοία Λιμενικών Εργασιών

Τα ρυμουλκά χαρακτηρίζονται από ακραίες μεταβολές φορτίου (από αναμονή σε πλήρη ισχύ ρυμούλκησης). Η υβριδική αρχιτεκτονική επιτρέπει την άμεση παροχή ροπής μέσω των ηλεκτροκινητήρων, ενώ οι μπαταρίες καλύπτουν τις περιόδους χαμηλής ζήτησης. Σύμφωνα με τη μελέτη του Banaei et al. (2023), τα υβριδικά ρυμουλκά επιτυγχάνουν τη συντομότερη περίοδο απόσβεσης λόγω της μεγάλης εξοικονόμησης καυσίμου σε συνθήκες αναμονής.

5.2.4 Εμπορικά Πλοία Μεγάλων Αποστάσεων

Για πλοία όπως Bulk Carriers και Tankers, η υβριδοποίηση επικεντρώνεται στα βοηθητικά συστήματα και τη χρήση Shaft Generators (PTO/PTI). Η ενσωμάτωση ESS επιτρέπει τη λειτουργία Peak Shaving για τα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, διασφαλίζοντας ότι οι βοηθητικές μηχανές λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο απόδοσης. Αυτό είναι κρίσιμο για τη διατήρηση του δείκτη CII σε αποδεκτά επίπεδα, προστατεύοντας την εμπορική αξία του πλοίου (Lindstad et al., 2021; Isalos.net, 2021).

5.3 Προτάσεις Βέλτιστων Λύσεων και Μελλοντικές Τάσεις

Η μετάβαση προς την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας καθιστά την υβριδοποίηση όχι απλώς μια προαιρετική αναβάθμιση, αλλά μια θεμελιώδη προϋπόθεση για τη λειτουργική επιβίωση του στόλου στο σύγχρονο κανονιστικό περιβάλλον. Οι βέλτιστες λύσεις που αναλύθηκαν, από τα Plug-in Hybrid συστήματα της ακτοπλοΐας έως τις διατάξεις Peak Shaving στην ποντοπόρο ναυτιλία, αποδεικνύουν ότι η τεχνολογία είναι πλέον ώριμη να προσφέρει απτά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, μειώνοντας δραστικά το αποτύπωμα άνθρακα και το OPEX συντήρησης. Η μελλοντική εξέλιξη του κλάδου αναμένεται να επικεντρωθεί στην περαιτέρω ενσωμάτωση Κυψελών Καυσίμου (Fuel Cells) και συστημάτων Energy Management (EMS) με χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης, τα οποία θα βελτιστοποιούν σε πραγματικό χρόνο τη ροή ενέργειας μεταξύ διαφορετικών πηγών. Παράλληλα, η ωρίμανση των υποδομών Onshore Power Supply (OPS) στα ελληνικά και διεθνή λιμάνια θα επιτρέψει τη μέγιστη αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας, μετατρέποντας τα πλοία σε ενεργούς κόμβους ενός ευρύτερου έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου. Συμπερασματικά, η στρατηγική επένδυση σε υβριδικές αρχιτεκτονικές, υποστηριζόμενη από τη συνεχή εκπαίδευση του πληρώματος και την κανονιστική εναρμόνιση, αποτελεί τον ασφαλέστερο δρόμο για μια ανταγωνιστική, πράσινη και βιώσιμη ναυτιλία.

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη διεξοδική μελέτη των υβριδικών συστημάτων πρόωσης και ενέργειας που έχουν εφαρμοστεί ή δύνανται να εφαρμοστούν στη ναυτιλία, με στόχο την αξιολόγηση της τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής τους συνεισφοράς, καθώς και τη διερεύνηση της συμβατότητάς τους με το σύγχρονο κανονιστικό πλαίσιο. Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης, αναδεικνύονται κρίσιμες μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και διατυπώνονται στοχευμένες προτάσεις με έμφαση στην ελληνική ναυτιλία.

6.1 Συνοπτικά Συμπεράσματα της Μελέτης

Η ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας και των εφαρμοσμένων τεχνολογικών λύσεων κατέδειξε ότι τα υβριδικά συστήματα πρόωσης και ενέργειας αποτελούν μία από τις πλέον ώριμες και ρεαλιστικές επιλογές για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων στη σημερινή μεταβατική περίοδο της ναυτιλίας (Boveri et al., 2023). Η υβριδοποίηση δεν συνιστά μία μονοδιάστατη τεχνολογική λύση, αλλά ένα ευέλικτο πλαίσιο συνδυασμού διαφορετικών πηγών και μορφών ενέργειας, προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις κάθε τύπου πλοίου. Από τεχνικής άποψης, διαπιστώθηκε ότι τα υβριδικά συστήματα επιτρέπουν την αποδοτικότερη λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης, περιορίζοντας τη λειτουργία τους σε περιοχές χαμηλής απόδοσης και υψηλής ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC). Η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS) συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος, στην απορρόφηση αιχμών φορτίου (Peak Shaving) και στη μείωση της μηχανικής καταπόνησης, με άμεσες θετικές επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και στην αξιοπιστία λειτουργίας (Geertsma et al., 2017).

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, τα υβριδικά συστήματα αναδείχθηκαν ως αποτελεσματικό εργαλείο μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x), οξειδίων του θείου (SO_x) και σωματιδίων, ιδίως σε λειτουργικές καταστάσεις χαμηλής ταχύτητας και λιμενικών ελιγμών. Η δυνατότητα αμιγώς ηλεκτρικής λειτουργίας σε ευαίσθητες περιβαλλοντικά περιοχές προσδίδει ιδιαίτερη αξία στα υβριδικά συστήματα, τόσο από περιβαλλοντική όσο και από κοινωνική σκοπιά (Inal & Deniz, 2021).

Η οικονομική αξιολόγηση κατέδειξε ότι, παρά το αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης (CAPEX), τα υβριδικά συστήματα μπορούν να είναι οικονομικά

βιώσιμα όταν εφαρμόζονται σε κατάλληλα επιχειρησιακά προφίλ. Η εξοικονόμηση καυσίμου, η μείωση του κόστους συντήρησης και η αποφυγή μελλοντικών επιβαρύνσεων που σχετίζονται με περιβαλλοντικούς κανονισμούς (EU ETS) συμβάλλουν στη βελτίωση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής. Ωστόσο, τονίστηκε ότι η οικονομική απόδοση εξαρτάται έντονα από τον τύπο του πλοίου, τη διάρκεια εκμετάλλευσης και τις τιμές καυσίμων και ενέργειας (Banaei et al., 2023). Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η συμβολή των υβριδικών συστημάτων στη συμμόρφωση με το κανονιστικό πλαίσιο του International Maritime Organization (IMO). Οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης και έντασης άνθρακα (EEDI, EEXI, CII) καθιστούν πλέον αναγκαία τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των πλοίων, και τα υβριδικά συστήματα προσφέρουν μια άμεση και τεχνικά εφαρμόσιμη λύση, ιδιαίτερα για υφιστάμενα πλοία που δυσκολεύονται να συμμορφωθούν με τα νέα όρια.

Συνολικά, η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα υβριδικά συστήματα δεν αποτελούν πανάκεια, αλλά ένα κρίσιμο μεταβατικό εργαλείο προς τη βιώσιμη και χαμηλών εκπομπών ναυτιλία, με εφαρμογές που πρέπει να αξιολογούνται κατά περίπτωση.

6.2 Μελλοντικές Ερευνητικές Κατευθύνσεις

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, η έρευνα στον τομέα των υβριδικών συστημάτων πρόωσης και ενέργειας στη ναυτιλία παραμένει δυναμική και πολυδιάστατη. Μία από τις βασικότερες μελλοντικές κατευθύνσεις αφορά τη βελτίωση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, η ενίσχυση της ασφάλειας και η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των συσσωρευτών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ευρύτερη εφαρμογή της υβριδοποίησης, ιδιαίτερα σε πλοία μεγαλύτερης ισχύος. Παράλληλα, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας (EMS). Η αξιοποίηση αλγορίθμων βελτιστοποίησης, τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης μπορεί να οδηγήσει σε δυναμική και προσαρμοστική κατανομή ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη πραγματικά δεδομένα λειτουργίας, καιρικές συνθήκες και επιχειρησιακές απαιτήσεις (Kalikatzarakis et al., 2022).

Μια ακόμη σημαντική κατεύθυνση αφορά τη συνδυαστική αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων με εναλλακτικά καύσιμα χαμηλού ή μηδενικού άνθρακα, όπως το υδρογόνο, η αμμωνία και τα συνθετικά καύσιμα. Η υβριδοποίηση μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης για την ομαλή ενσωμάτωση αυτών των καυσίμων, περιορίζοντας τις απαιτήσεις ισχύος και

αυξάνοντας την ευελιξία του ενεργειακού συστήματος του πλοίου (Ναυτικά Χρονικά, 2022). Επιπλέον, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε θέματα ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA), ώστε να αποτιμώνται συνολικά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υβριδικών λύσεων, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής, χρήσης και ανακύκλωσης του εξοπλισμού. Η ολιστική αυτή προσέγγιση είναι απαραίτητη για την τεκμηρίωση της πραγματικής βιωσιμότητας των υβριδικών τεχνολογιών.

6.3 Προτάσεις για την Ελληνική Ναυτιλία

Η ελληνική ναυτιλία, ως ένας από τους σημαντικότερους παγκόσμιους ναυτιλιακούς τομείς, διαθέτει τη δυναμική να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο στη μετάβαση προς πιο βιώσιμες μορφές πρόωσης. Η υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων μπορεί να αποτελέσει στρατηγική επιλογή, ιδιαίτερα σε τομείς όπου τα επιχειρησιακά χαρακτηριστικά ευνοούν την εφαρμογή τους (Isalos.net, 2021). Ο ακτοπλοϊκός στόλος αποτελεί το πλέον πρόσφορο πεδίο για άμεση αξιοποίηση υβριδικών λύσεων. Τα επαναλαμβανόμενα δρομολόγια, οι μικρές αποστάσεις και η λειτουργία σε περιοχές αυξημένης περιβαλλοντικής ευαισθησίας καθιστούν τα υβριδικά και ηλεκτρικά συστήματα ιδιαίτερα αποδοτικά. Η ανάπτυξη λιμενικών υποδομών φόρτισης (Onshore Power Supply) και η αξιοποίηση ευρωπαϊκών χρηματοδοτικών εργαλείων μπορούν να επιταχύνουν σημαντικά τη μετάβαση αυτή (Παπαδόπουλος, 2020).

Παράλληλα, τα πλοία λιμενικών εργασιών, τα ρυμουλκά και τα πλοία μικρών αποστάσεων προσφέρουν τη δυνατότητα πιλοτικής εφαρμογής και δοκιμής νέων τεχνολογιών σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Η εμπειρία που θα αποκτηθεί μπορεί να λειτουργήσει ως βάση για την ευρύτερη υιοθέτηση υβριδικών λύσεων και σε άλλες κατηγορίες πλοίων. Σε στρατηγικό επίπεδο, κρίνεται αναγκαία η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ ναυτιλιακών εταιρειών, πανεπιστημίων, ερευνητικών κέντρων και ναυπηγείων, με στόχο την ανάπτυξη εγχώριας τεχνογνωσίας στον τομέα της υβριδοποίησης. Η επένδυση στην εκπαίδευση και κατάρτιση ναυτικών και μηχανικών αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα για την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία των νέων συστημάτων.

Συνοψίζοντας, η υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων πρόωσης και ενέργειας μπορεί να αποτελέσει για την ελληνική ναυτιλία όχι μόνο μέσο συμμόρφωσης με τις διεθνείς κανονιστικές απαιτήσεις, αλλά και ευκαιρία ενίσχυσης της ανταγωνιστικότητας και της τεχνολογικής πρωτοπορίας της σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο παγκόσμιο περιβάλλον.

Κατάλογος Συντμήσεων (Abbreviations)

ABB – Asea Brown Boveri

CII – Carbon Intensity Indicator

CO₂ – Carbon Dioxide

ECA / ECAs – Emission Control Area / Emission Control Areas

EEDI – Energy Efficiency Design Index

EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index

ESS – Energy Storage System

GHG – Greenhouse Gases

HFO – Heavy Fuel Oil

HV – High Voltage

IC Engine – Internal Combustion Engine

IMO – International Maritime Organization

LNG – Liquefied Natural Gas

MARPOL – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships

MEPC – Marine Environment Protection Committee

MGO – Marine Gas Oil

NO_x – Nitrogen Oxides

OSV – Offshore Support Vessel

SEEMP – Ship Energy Efficiency Management Plan

SO_x – Sulfur Oxides

WASP – Wind-Assisted Ship Propulsion

WHR – Waste Heat Recovery

Βιβλιογραφία και Πηγές

1. Διεθνείς Οργανισμοί, Θεσμικό Πλαίσιο & Κανονισμοί

- **IMO. (2011).** *Resolution MEPC.203(62): Amendments to MARPOL Annex VI (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships)*. International Maritime Organization.
- **IMO. (2019).** *MARPOL Annex VI and NTC 2008: Regulations for the prevention of air pollution from ships*. International Maritime Organization.
- **IMO. (2021).** *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*. International Maritime Organization.
- **IMO. (2021).** *Resolution MEPC.328(76): Amendments to MARPOL Annex VI (EEXI, CII and SEEMP)*. International Maritime Organization.
- **IMO. (2022).** *Resolution MEPC.361(79): Amendments to MARPOL Annex VI (Regional Strategy for the Mediterranean Sea to prevent, reduce and control pollution from ships)*. International Maritime Organization.
- **IMO. (2023).** *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. International Maritime Organization.
- **REMPEC. (2023).** *The Mediterranean Sea as a SOx Emission Control Area (Med SOx ECA)*. Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea.
- **UNCTAD. (2024).** *Review of Maritime Transport*. United Nations Publication.

2. Επιστημονικά Περιοδικά & Ακαδημαϊκές Δημοσιεύσεις

- **Banaei, M., et al. (2023).** *A review of hybrid electric propulsion systems for ships: Recent advances and future perspectives*. Ocean Engineering, 273.
- **Bouman, E. A., et al. (2017).** *State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 52.
- **Boveri, A., et al. (2023).** *Hybrid propulsion systems for ships: A review of the state of the art and future perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- **Chou, T., et al. (2021).** *Wind-assisted ship propulsion (WASP): A review of the state-of-the-art and future trends*. Ocean Engineering.
- **Eyring, V., et al. (2010).** *Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping*. Atmospheric Environment, 44(37).

- **Geertsma, R. D., et al. (2017).** *Design and control of hybrid power and propulsion systems for ships: A review.* Applied Energy, 194.
- **Inal, O. B., et al. (2022).** *A review on hydrogen, ammonia, and methanol as marine fuels in context of cleaner ship emission.* Fuel, 302.
- **Kalikatzarakis, M., et al. (2022).** *Energy management strategies for maritime hybrid power systems: A review.* Ocean Engineering, 263.
- **Lindstad, E., Stocker, R., & Eskeland, G. S. (2021).** *Carbon intensity indicator (CII) and its greenhouse gas (GHG) reduction potential.* Ocean Engineering, 238.
- **Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2013).** *Speed optimization vs speed reduction: the many faces of slow steaming.* Maritime Economics & Logistics.
- **Shu, G., et al. (2013).** *A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships.* Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- **Sofiev, M., et al. (2018).** *Cleaner ship fuels confer delicate trade-offs between public health and climate anthropogenic self-forcing.* Nature Communications, 9(1).
- **Theotokatos, G., & Livanos, G. (2013).** *Techno-economical analysis of marine waste heat recovery systems based on combined cycle configurations.* Energy Conversion and Management, 76.
- **Viana, M., et al. (2015).** *Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe.* Atmospheric Environment, 90.
- **Zhu, M., Kuai, N., & Pan, X. (2022).** *Impact of EEXI and CII on ship energy efficiency and carbon intensity.* Journal of Marine Science and Engineering, 10(7).

3. Τεχνικές Αναφορές, Εγχειρίδια & Μελέτες Νηογνωμόνων

- **ABB Marine & Ports. (2015).** *MF Ampere: The world's first all-electric ferry.* Technical Report.
- **Bazari, Z., & Longva, T. (2011).** *Assessment of implementation of the Energy Efficiency Design Index (EEDI).* IMO Report, Lloyd's Register.
- **DNV. (2022).** *Compliance with CII and EEXI: Technical and operational challenges.* DNV Maritime Forecast.
- **DNV. (2022).** *Rules for classification: Ships — Part 6 Chapter 2 Propulsion and auxiliary systems - Battery power.*
- **Fjellstrand AS. (2014).** *Zero Emission Ferry: The Battery Powered Ampere.* Shipyard Specification Report.
- **Holland Shipyards Group. (2018).** *Eddy Tug Series: Hybrid Propulsion and Hydrodynamic Design.* Product Technical Manual.

- **Wärtsilä Corporation. (2019).** *Hybrid Power Systems for Offshore Support Vessels*. Technology White Paper.

4. Βιβλιογραφία (Συγγράμματα)

- **Carlton, J. (2018).** *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann.
- **Kuiken, K. (2018).** *Diesel Engines for Ship Propulsion*. Target Global Energy Training.
- **Psaraftis, H. N. (2019).** *Sustainable Shipping: A Multi-Disciplinary View*. Wiley-VCH.
- **Stopford, M. (2009).** *Maritime Economics (3rd ed.)*. Routledge.
- **Woud, J. K., & Stapersma, D. (2002).** *Design of Marine Propulsion Systems*. IMarEST.

5. Ελληνικές Πηγές & Άρθρα Ανάλυσης

- **Isalos.net. (2021).** *Υβριδικά συστήματα πρόωσης: Προκλήσεις και προοπτικές για την ποντοπόρο ναυτιλία*. Εκπαιδευτικό Υλικό / Άρθρο.
- **Ναυτικά Χρονικά. (2022).** *Η απανθρακοποίηση της ναυτιλίας και ο ρόλος των εναλλακτικών καυσίμων και της υβριδικής πρόωσης*.
- **Παπαδόπουλος, Α. (2020).** *Οικονομική αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων σε πλοία ακτοπλοΐας*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών.