ΒΟΥΡΟΣ ΦΩΚΙΩΝ

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΟΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ORC

Τομέας Θερμότητας, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων

Επιβλέπων: Δρ. Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2023

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

--- κενή σελίδα ---

<u>Υπεύθυνη δήλωση</u> για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Βούρος Φωκίων

Περιεχόμενα

1 Περίληψη6
2 Abstract7
3 Εισαγωγή8
3.1 Εφαρμογή ORC στο ναυτιλιακό τομέα9
3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά εφαρμογών συστημάτων ORC στη ναυτιλία9
3.1.2 Τύποι πλοίων10
3.2 Θερμοδυναμικό μοντέλο συστημάτων ORC**Error! Bookmark not defined.**
3.2.1 Περιγραφή μοντέλου συστήματος ORC με καύση βιομάζας11
3.2.2 Μαθηματικό μοντέλο ORC12
3.3 Εκτονωτικές διατάξεις ORC13
3.3.1 Στρόβιλοι εκτόνωσης (Turbo-Expanders)13
3.3.2 Στρόβιλοι ακτινικής εισροής (Radial Inflow Turbines)14
3.3.3 Στρόβιλοι ακτινικής εκροής (Radial Outflow Turbines)15
3.3.4 Διατάξεις εκτόνωσης κοχλία (screw expanders)15
3.3.5 Διατάξεις εκτόνωσης κυλίνδρων (Scrolls)16
3.4 Εναλλάκτες θερμότητας ORC17
3.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά εναλλακτών θερμότητας ORC σε πλοία17
3.4.2 Τύποι εναλλακτών ORC17
3.5 Επιλογή του ρευστού εργασίας σε ORC19
3.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Συστημάτων ORC.21
3.6.1 Πλεονεκτήματα :22
3.6.2 Μειονεκτήματα:22
4 Green House Gas Emissions.24
4.1 Στοιχεία από Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA).24
4.2 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου26
4.2.1 Τρέχουσες καταγραφές26
4.2.2 Επιμερισμός εκπομπών στους τομείς δραστηριότητας29
4.2.3 Επισκόπηση εκπομπών σε Ε.Ε. και Ελλάδα32
4.3 Τρέχουσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στη Ναυτιλία35
5 Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός39
5.1 Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)39
5.1.1 MARPOL40
5.2 Στόχοι του IMO για την μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου42
5.3 Τρόποι επίτευξης των στόχων του IMO44
5.3.1 Εναλλακτικά καύσιμα45
5.3.2 Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης πλοίων46
5.3.3 Επιχειρησιακές στρατηγικές48
5.3.4 Φόρος άνθρακα και συστήματα εμπορίας εκπομπών49
5.3.5 Τεχνολογίες μείωσης εκπομπών50
6 Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης Απορριπτόμενης Θερμότητας52
6.1 Εισαγωγή52
6.2 Πηγές απορριπτόμενης θερμότητας53

6.2.1 Διαγράμματα Sankey σε μελέτες κατανάλωσης ενέργειας σε πλοία55
6.3 Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από καυσαέρια57
6.3.1 Εξοικονομητές Καυσαερίων (EGEs)58
6.3.2 Συστήματα Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC)59
6.3.3 Γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας61
6.4 Ανάκτηση από συστήματα ψύξης κινητήρα (Engine Cooling Systems)64
6.4.1 Ψύξη με απορρόφηση (Absorption Cooling)64
6.4.2 Ψύξη με προσρόφηση (Adsorption Cooling)66
6.5 Ανάκτηση από άλλα βοηθητικά συστήματα (Other Auxiliary Systems)69
6.5.1 Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες (Thermoelectric Generators -TEGs):69
6.5.2 Ενίσχυση Κύκλου Συμπίεσης Ατμών (Vapor Compression Cycle Enhancement)70
6.6 Διαμορφώσεις πλοίου και τεχνολογίες ανάκτησης72
6.6.1 Τυπική Διαμόρφωση πλοίου72
6.6.2 Διαφορές στη διαμόρφωση ανά κατηγορία πλοίου74
6.6.3 Τεχνολογίες εκμετάλλευσης απορριπτόμενης θερμότητα ανά είδος πλοίου76
7 Εφαρμογές κύκλου ORC σε πλοία79
7.1 Το Arnold Maersk79
7.2 Το MS - Birka στην Βαλτική Θάλασσα81
7.3 Το MV Figaro84
8 Οικονομοτεχνική Μελέτη87
8.1 Σύντομη περιγραφή της μελέτης87
8.1.1 Περιγραφή πλοίου μελέτης87
8.1.2 Πορεία της έρευνας87
8.1.3 Ανάλυση ταξιδιού88
8.1.4 Στόχοι της έρευνας91
8.1.5 Αντίκτυπο ναυτιλίας**Error! Bookmark not defined.**
8.2 Σχεδιασμός και έλεγχος συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ORC91
8.2.1 Η αρχιτεκτονική του κύκλου ORC92
8.3 Υπολογισμός χαρακτηριστικών απαιτούμενης γεννήτριας**Error! Bookmark not defined.**
8.4 Υπολογισμός όξινου σημείου δρόσου93
8.4.1 Προέλευση και ορισμός της ADP93
9 Μοντελοποίηση συστήματος ORC96
10 Σύγκριση αποτελεσμάτων100
10.1 Ενεργειακή Ανάλυση100
10.2 Κόστος του συστήματος104
11 Συμπεράσματα110
11.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα110
12 Αναφορές111

1 Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη θεματική ενότητα της Εξοικονόμησης Ενέργειας στα πλοία με χρήση συστημάτων ORC (Organic Rankine Cycle). Ένα σύστημα ORC είναι ένας κλειστός θερμοδυναμικός κύκλος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας από πηγές θερμότητας χαμηλής έως μέσης-υψηλής θερμοκρασίας. Δεδομένου ότι οι συμβατικοί κύκλοι ατμοηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορούν να δώσουν καλύτερη απόδοση για την ανάκτηση χαμηλής ποιότητας απορριπτόμενης θερμότητας, οι οργανικός κύκλος Rankine (ORC) προτείνεται για την ανάκτηση χαμηλής βαθμού απορριπτόμενης θερμότητας. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι, να εξετάσουμε την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων σε πλοία και τα περιθώρια αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας, με στόχο την πιο οικολογική λειτουργία των πλοίων. Για να το πετύχουμε αυτό, μελετήσαμε το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την συνεισφορά του ναυτικού τομέα σε αυτό. Έπειτα εξετάσαμε τους κανονισμούς και τις δράσεις του IMO (International Maritime Organization). Σειρά είχε η μοντελοποίηση των ενεργειακών ροών μηχανών του πλοίου και η εφαρμογή του κύκλου ORC σε διαφορετικά πλοία με τυπικά δρομολόγια. Τέλος, πραγματοποιήσαμε μια οικονομοτεχνική μελέτη, ώστε να καταλήξουμε μέσω ανάλυσής της στα συμπεράσματά μας, τα οποία παραθέτω στος Κεφάλαιο 10. Απώτερος σκοπός της εργασίας είναι να γίνει κατανοητό, πως τα συστήματα ORC μπορούν να αποτελέσουν αξιόπιστη λύση εξοικονόμησης ενέργειας για την ναυτιλία.

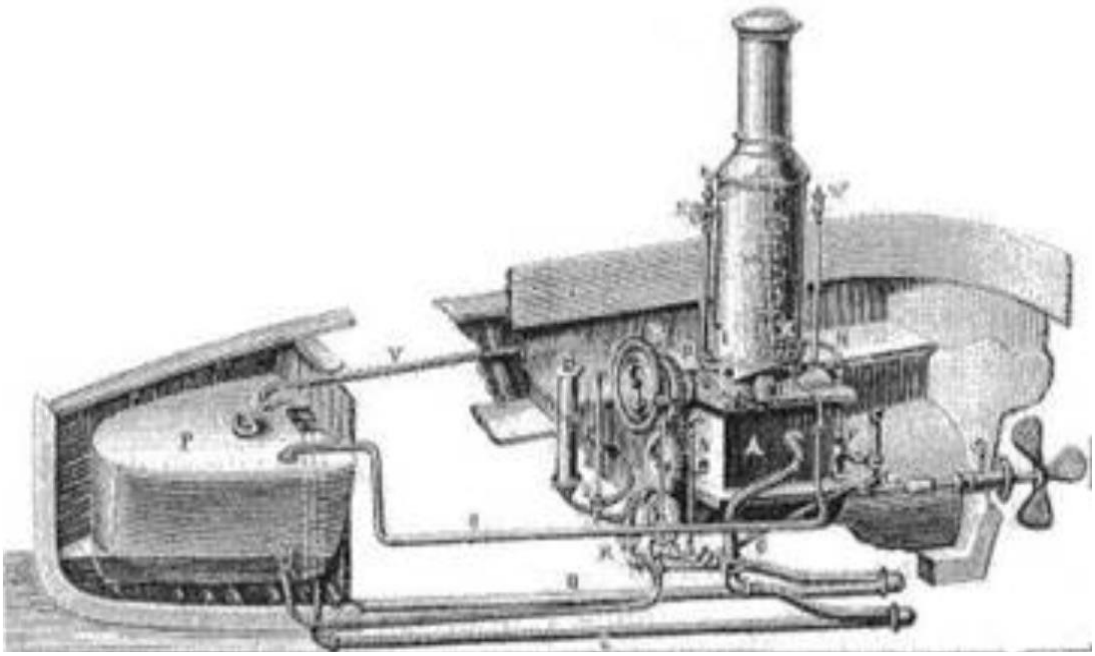
2 Abstract

This thesis deals with the topic of Energy Conservation on board ships using ORC (Organic Rankine Cycle) systems. An ORC system is a closed thermodynamic cycle used to produce energy from low to medium-high temperature heat sources. Since conventional steam power cycles cannot give better performance for recovering low grade waste heat, Organic Rankine Cycle (ORC) is proposed for recovering low grade waste heat. The purpose of this paper is, to investigate the application of such systems in ships and the potentials of waste heat recovery, with the aim of greener operation of ships. To achieve this, we studied the greenhouse effect and the contribution of the maritime sector to it. We then looked at the regulations and actions of the IMO (International Maritime Organization). Next we modelled the ship's engine energy flows and applied the ORC cycle to different ships on typical routes. Finally, we carried out an econometric study in order to arrive at our conclusions through its analysis, which is shown in Chapter 10. The ultimate goal of the paper is to understand how ORC systems can be a reliable energy saving solution for shipping.

3 Εισαγωγή

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC) είναι μια προηγμένη θερμοδυναμική διαδικασία που έχει σχεδιαστεί για να μετατρέπει τη «χαμηλής ποιότητας» θερμική ενέργεια (low-grade thermal energy) σε μηχανική ισχύ, η οποία στη συνέχεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτός ο κύκλος είναι ιδιαίτερα σημαντικός λόγω της ικανότητάς του να χρησιμοποιεί πηγές θερμότητας που συνήθως θεωρούνται ανεπαρκείς για τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Σε αντίθεση με τον κύκλο Rankine νερού ατμού, ώς εργαζόμενο μέσο χρησιμοποιούνται οργανικά ρευστά. Αυτά τα οργανικά ρευστά έχουν χαμηλότερα σημεία βρασμού από το νερό, επιτρέποντας στο ORC να αξιοποιεί αποτελεσματικά τη θερμότητα από πηγές με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, οι οποίες συναντόνται στα απέρια από την καύση βιομάζας, στην απορριπτόμενη βιομηχανική θερμότητα (industrial waste heat), από γεωθερμικούς πόρους καθώς και θερμοηλιακά πεδία.

Σήμερα, η τεχνολογία ORC είναι ευρέως αναγνωρισμένη και χρησιμοποιείται, ειδικά στους τομείς της βιομάζας και της γεωθερμίας. Μόνο η Ευρώπη διαθέτει περίπου 200–230 λειτουργικές μονάδες οργανικού κύκλου Rankine.



Εικόνα 1: Κινητήρας ORC με «εκτόξευση» νάφθας του Frank W. Ofeldt το 1897 [1]

3.1 Εφαρμογή ORC στο ναυτιλιακό τομέα

3.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά εφαρμογών συστημάτων ORC στη ναυτιλία

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας ORC στον ναυτιλιακό τομέα σηματοδοτεί μια σημαντική εξέλιξη μιας και αντιμετωπίζει άλλες προκλήσεις σε σχέση με τις αρχικές εφαρμογές της στην ξηρά. Τα συστήματα ORC προσαρμοσμένα να αξιοποιούν «χαμηλής ποιότητας» απορριπτόμενη θερμότητα ήταν συνήθως σχεδιασμένα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για χρήση σε βιομηχανικές διεργασίες που όμως έδωσαν το έναυσμα για θαλάσσιες εφαρμογές λόγω της παρόμοιας φύσης των πηγών απορριπτόμενης θερμότητας στα πλοία.

Η προσαρμογή στο θαλάσσιο περιβάλλον έχει απαιτήσει σημαντικές μηχανικές καινοτομίες για την αντιμετώπιση των μοναδικών λειτουργικών και χωρικών περιορισμών των πλοίων. Για παράδειγμα, τα πρώιμα θαλάσσια συστήματα ORC έπρεπε να ξεπεράσουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με την κίνηση των πλοίων και την αλατούχα ατμόσφαιρα, η οποία θα μπορούσε ενδεχομένως να υποβαθμίσει την ποιότητα και το χρόνο ζωής των μηχανικών στοιχείων [2] .

Οι πρόσφατες εξελίξεις στο πεδίο εφαρμογής έχουν δείξει ότι τα συστήματα ORC μπορούν να επιτυγχάνουν θερμική απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 10% και 20%, βελτιώνοντας σημαντικά τη συνολική ενεργειακή απόδοση των πλοίων. Ειδική αναφορά γίνεται σε μελέτη εφαρμογής του ORC σε έναν εξακύλινδρο ναυτικό κινητήρα ντίζελ που έδειξε ότι η ενσωμάτωση ενός συστήματος ORC θα μπορούσε να αυξήσει τη θερμική απόδοση του κινητήρα ανακτώντας έως και 12,7% της απορριπτόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια. Αυτό το κέρδος απόδοσης μεταφράζεται άμεσα σε εξοικονόμηση καυσίμου και μειωμένες εκπομπές CO_2, συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων που ορίζονται από τα διεθνή πρότυπα [3].

Αν και η εφαρμογή της τεχνολογίας ORC σε πλοία είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης υπάρχουν εταιρείες οι οποίες έχουν αναπτύξει συστήματα ORC ειδικά σχεδιασμένα για θαλάσσιες εφαρμογές. Τα συστήματα αυτά είναι συνήθως συμπαγή και ελαφριά, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για χρήση σε πλοία. Έχουν επίσης σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε δύσκολες θαλάσσιες συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των υψηλών κραδασμών, της διάβρωσης και του αλμυρού νερού. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εταιρειών που έχουν δραστηριοποιηθεί πρόσφατα είναι :

- Alfa Laval: Έχει αναπτύξει το E-PowerPack, ένα αξιοσημείωτο σύστημα ORC που έχει σχεδιαστεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διάφορες πηγές θερμότητας στα πλοία, όπως η θερμότητα των καυσαερίων και το νερό του κινητήρα. Αυτό το σύστημα στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO_2. Το E-PowerPack ξεχωρίζει με αναφορές που παρουσιάζει δυνατότητες μετατροπής έως και 50% της ενέργειας που περιέχεται στα καυσαέρια σε ηλεκτρική , γεγονός που μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος [4].

- Climeon: Η εταιρεία αυτή κυκλοφόρησε το σύστημα HeatPower 300 Marine, που χαρακτηρίστηκε ως μια σημαντική εξέλιξη στην αγορά ναυτιλιακών ORC. Το HeatPower 300 Marine έχει σχεδιαστεί για να μεγιστοποιεί τη διαθεσιμότητα αξιοποιήσιμης θερμικής ενέργειας και την παραγωγή καθαρής ενέργειας από πηγές θερμότητας «χαμηλής ποιότητας». Προσφέρει μια αρθρωτή και επεκτάσιμη λύση που μπορεί να προσαρμοστεί τόσο για νεότευκτα πλοία όσο και για μετασκευές, ενισχύοντας τη λειτουργική ευελιξία και συμβάλλοντας στους στόχους βιωσιμότητας [5].

Συμπερασματικά, τα συστήματα ORC έχουν χρησιμοποιηθεί σε περιορισμένες θαλάσσιες εφαρμογές ακόμα (βλ. Κεφάλαιο 7), και οι δυνατότητές τους για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών τα καθιστούν μια ελκυστική επιλογή για τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων που επιθυμούν να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.

3.1.2 Τύποι πλοίων

Τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων, τα δεξαμενόπλοια και τα επιβατηγά πλοία είναι μεταξύ των τύπων που μπορούν να επωφεληθούν σημαντικά από τα συστήματα ORC. Αυτά τα πλοία έχουν σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις και πολλές ώρες λειτουργίας, καθιστώντας τα ιδανικά υποψήφια για εφαρμογή ORC. Η τεχνολογία ευθυγραμμίζεται καλά με τις τρέχουσες τάσεις στη ναυτιλιακή βιομηχανία, όπως η μετάβαση προς το LNG και άλλα εναλλακτικά καύσιμα, τα οποία ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφορετικές ευκαιρίες και προκλήσεις ανάκτησης απορριμμάτων θερμότητας [3] [6].

Πρακτικά η εφαρμογή της τεχνολογίας ORC σε διάφορους τύπους πλοίων έχει δείξει δυνατότητες ανάκτησης περίπου 3.450 kW απορριπτόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια, που μεταφράζεται σε εκτιμώμενη ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου περίπου 1.580 τόνων. Πιο συγκεκριμένα, στην εφαρμογή που εξετάστηκε το πλοίο λειτουργούσε με τη βοήθεια τεσσάρων μηχανών Wartsila ισχύος 1950 kW η κάθε μια [7].

Η ενσωμάτωση συστημάτων ORC σε σύγχρονα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχει μελετηθεί για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας σε διαφορετικά επιχειρησιακά προφίλ, λαμβάνοντας υπόψη μεταβλητές συνθήκες ταχύτητας και φορτίου τυπικές για θαλάσσια ταξίδια.

Η μεταβλητότητα στη λειτουργική απόδοση των συστημάτων ORC μπορεί να αντιμετωπιστεί από προηγμένα συστήματα ελέγχου που προσαρμόζουν τις παραμέτρους σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποιώντας τον ρυθμό ανάκτησης θερμότητας ανάλογα με το φορτίο του κινητήρα και τις συνθήκες της θάλασσας. Αυτή η δυναμική βελτιστοποίηση μπορεί να βελτιώσει τις αποδόσεις του συστήματος ORC έως και 30% κάτω από ποικίλες συνθήκες λειτουργίας [6].

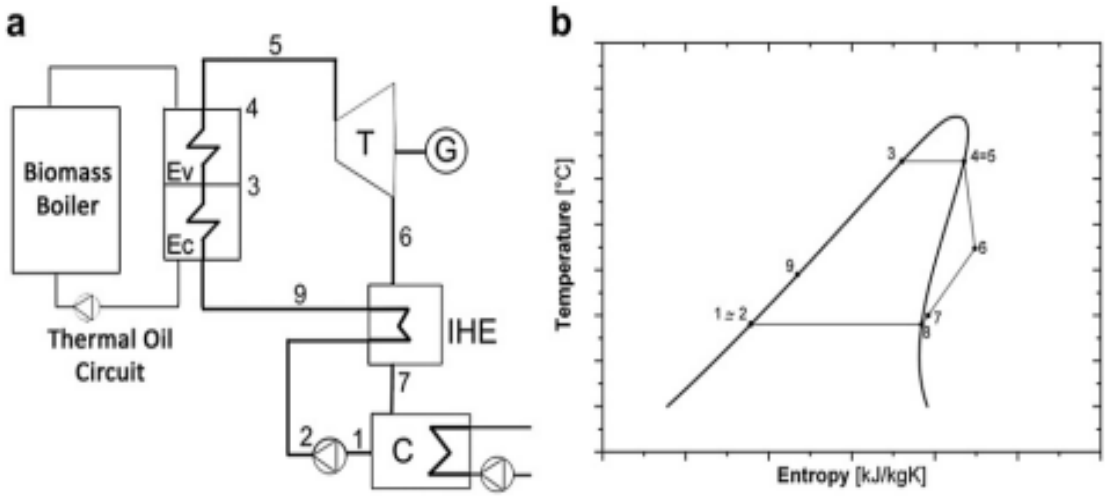
3.1.3 Περιγραφή μοντέλου συστήματος ORC με καύση βιομάζας

Η Εικόνα 2 (α) παρουσιάζει ένα σύστημα Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) με ενσωματωμένη διάταξη λέβητα βιομάζας. Το κύκλωμα διαθερμικού ελαίου που εφαρμόζεται στο σύστημα λειτουργεί ως μέσον στη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας. Ο σχεδιασμός του συστήματος βασίζεται στην εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας που προκύπτει από την ελεγχόμενη καύση βιομάζας. Η βιομάζα θεωρείται πόρος ουδέτερος σε αποτύπωμα άνθρακα και συμβάλλει στη βιώσιμη παραγωγή ενέργειας. Η θερμική ενέργεια που παράγεται στο σύστημα καύσης βιομάζας μεταφέρεται μέσω του ενδιάμεσου κυκλώματος διαθερμικού ελαίου στο εργαζόμενο υγρό του κυκλώματος ORC χωρίς άμεση έκθεση σε θερμοκρασίες καύσης, οι οποίες θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο τη σύσταση και τις ιδιότητες του.

Η διαδικασία εκτυλίσσεται ως εξής: ο λέβητας βιομάζας εκκινεί την διαδικασία αναφλέγοντας το καύσιμο βιομάζας, δημιουργώντας θερμότητα σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Η θερμότητα που παράγεται στη συνέχεια μεταφέρεται στο διαθερμικό έλαιο, το οποίο επιλέγεται για τη σταθερότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες και την αποτελεσματικότητά του στη μεταφορά θερμικής ενέργειας. Το κύκλωμα θερμικού λαδιού εξασφαλίζει μια σταθερή ροή θερμότητας στον εξατμιστή (Ev), μετασχηματίζοντας το εργαζόμενο οργανικό μέσο σε ατμό, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα της σύστασής του. Η διαδικασία συνεχίζεται με το εξατμισμένο οργανικό ρευστό να εκτονώνεται στον στρόβιλο (T), που συνδέεται με μια γεννήτρια (G), μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια σε μηχανικό έργο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αναπόσπαστο μέρος της θερμικής ρύθμισης του συστήματος είναι ο εσωτερικός εναλλάκτης θερμότητας (IHE), ο οποίος ανακτά την υπολειπόμενη θερμότητα από το ρευστό μετά τον στρόβιλο, βελτιώνοντας τη συνολική θερμική απόδοση του συστήματος και μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας. Στη συνέχεια, ο συμπυκνωτής (C) ψύχει και συμπυκνώνει το ρευστό, μετασχηματίζοντας το ξανά σε υγρή κατάσταση. Το υγρό στη συνέχεια συμπιέζεται από την αντλία, έτοιμο να ξαναθερμανθεί, ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο.

Το σύστημα ORC σχεδιάζεται με βάση την εξέταση των θερμικών και φυσικών ιδιοτήτων του οργανικού ρευστού λειτουργίας, που επιλέγεται συνήθως για χαρακτηριστικές ιδιότητες το όπως χαμηλό σημείο βρασμού και η υψηλή μοριακή μάζα. Αυτές οι ιδιότητες είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για μεταφορά ενέργειας από πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.

Η Εικόνα 2b δείχνει τον αντίστοιχο κύκλο στο διάγραμμα Θερμοκρασίας-Εντροπίας (T-s) για ένα τυπικό ξηρό οργανικό υγρό με κορεσμένες συνθήκες στην είσοδο του στροβίλου. Στην πραγματικότητα, οι διεισδύσεις αέρα είναι χαμηλές (οι εγκαταστάσεις ORC είναι συχνά στεγανοποιημένες στη βιομηχανία) και μία μικρή αντλία κενού αέρος στον συμπυκνωτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση της περίσσειας αέρα.



Εικόνα 2 : Οργανικός κύκλος Rankine με λέβητα βιομάζας

3.1.4 Μαθηματικό μοντέλο ORC

Για λόγους πληρότητας παρακάτω αναφέρεται η μαθηματική μοντελοποίηση των βασικών ενεργειακών δεικτών ενός τυπικού κύκλου ORC

Η θερμική απόδοση n_{th} ορίζεται από τον παρακάτω τύπο :

1)

$$n_{th} = \frac{P_u}{\dot{Q}_i}$$

Όπου, με P_u συμβολίζουμε την καθαρή ισχύ εξόδου και με $\dot{Q}_i$ την θερμική ισχύ που μεταφέρεται μέσω του εργαζομένου υγρού.

Ειδικότερα, η καθαρή ισχύς εξόδου αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της ισχύος του στροβίλου P_t και της ισχύος που ζητείται από την αντλία P_p:

2)

$$P_u = P_t - P_p$$

Η ισχύς του στροβίλου και της ανλίας, υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις (3) και (4) αντίστοιχα:

$$\boldsymbol{P_t = \eta_{is,t}\dot{m}l_{is,t} = \dot{m}l_t = \dot{m}(h_5 - h_6)}$$

$$P_p = \dot{m}\frac{l_{is,p}}{\eta_{is,p}} = \dot{m}l_p = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

όπου, $\dot{m}$ είναι ο ρυθμός ροής μάζας του οργανικού ρευστού, $\eta_{is,t}$ είναι η ισεντροπική απόδοση του στροβίλου, $\eta_{is,p}$ είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της αντλίας, $l_{is,t}$ είναι το ισεντροπικό ειδικό έργο του στροβίλου, $l_{is,p}$ είναι το ισεντροπικό ειδικό έργο της αντλίας, l_t είναι το ειδικό έργο του στροβίλου, l_p είναι το ειδικό έργο της αντλίας και h_i είναι η ειδική ενθαλπία του σημείου i της γενικής κατάστασης.

Η θερμική ισχύς που μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό εκτιμάται ως εξής :

$$\dot{Q}_i = \dot{m}q_i$$

Όπου η θερμότητα που μεταφέρεται στο εργαζόμενο υγρό είναι

$$q_i = h_5 - h_2$$

στην περίπτωση που λείπει ο θερμικός εναλλάκτης, ενώ

$$q_i = h_5 - h_9$$

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η απόδοση του εσωτερικού θερμικού εναλλάκτη δίνεται από τον τύπο:

$$\eta_{IHE} = \frac{h_9 - h_2}{h_6 - h_7}$$

Όπου η θερμοκρασία στην έξοδο της εσωτερικής γεννήτριας T_7 είναι υψηλότερη από την θερμοκρασίας συμπήκνωσης T_{cond} όπως φαίνεται και από τον παρακάτω τύπο

$$T_7 = T_{cond} + \Delta T$$

3.2 Εκτονωτικές διατάξεις ORC

3.2.1 Στρόβιλοι εκτόνωσης (Turbo-Expanders)

Οι στρόβιλοι ως διατάξεις εκτόνωσης είναι βασικοί στα συστήματα οργανικού κύκλου Rankine (ORC). Κατηγοριοποιούνται σε αξονικούς και ακτινικούς στρόβιλους, ο καθένας προσαρμοσμένος για συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις λόγω των διακριτών χαρακτηριστικών τους.

- **Αξονικοί στρόβιλοι (axial turbines)**: Οι αξονικοί στρόβιλοι χαρακτηρίζονται από την παράλληλη ροή του εργαζόμενου ρευστού σε σχέση με τον άξονα του στροβίλου, καθιστώντας τους κατάλληλους για εφαρμογές που απαιτούν χειρισμό μεγάλων όγκων ρευστού σε χαμηλότερες αναλογίες πίεσης. Αυτοί οι στρόβιλοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως σε σταθμούς

ηλεκτροπαραγωγής όπου είναι συνηθισμένοι υψηλοί ρυθμοί ροής μάζας. Ο σχεδιασμός των αξονικών στροβίλων επιτρέπει υψηλή απόδοση, ιδιαίτερα υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, οι αξονικοί στρόβιλοι τείνουν να αποδίδουν καλύτερα σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού σε σύγκριση με τους ακτινωτούς στρόβιλους, κάτι που είναι πλεονεκτικό για εφαρμογές με μεταβλητές λειτουργικές απαιτήσεις [8] [9].

- **Ακτινικοί στρόβιλοι (radial turbines)**: Οι ακτινικοί στρόβιλοι διαθέτουν μια ροή που εισέρχεται ακτινικά σε σχέση με τον άξονα και μεταβαίνει συνήθως σε αξονική στην έξοδο. Αυτή η διαμόρφωση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για εφαρμογές με χαμηλότερους ρυθμούς ροής μάζας και υψηλότερους λόγους πίεσης, δηλαδή σε τυπικά συστήματα ORC μεσαίας κλίμακας. Οι ακτινικοί στρόβιλοι είναι συμπαγείς, καθιστώντας τους κατάλληλους για μικρότερα συστήματα και εφαρμογές που απαιτούν ανθεκτικότητα κάτω από μεταβλητές θερμικές συνθήκες. Ο ακτινωτός σχεδιασμός επιτρέπει επίσης σε αυτούς τους στρόβιλους να χειρίζονται αποτελεσματικά το αυξημένο φορτίο πτερυγίων, το οποίο είναι ζωτικής σημασίας όταν χρησιμοποιούνται ρευστά υψηλής πυκνότητας όπως σε τυπικά συστήματα ORC [10] [8].

Και οι δύο τύποι στροβίλων έχουν προσαρμοστεί για αποτελεσματική χρήση σε συστήματα ORC, βελτιστοποιώντας τα σχέδιά τους για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, ειδικά στη μετατροπή της θερμότητας χαμηλής ποιότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η επιλογή μεταξύ αξονικών και ακτινικών στροβίλων εξαρτάται γενικά από τις ειδικές απαιτήσεις του συστήματος ORC, συμπεριλαμβανομένης της κλίμακας λειτουργίας, της φύσης της πηγής θερμότητας και της επιθυμητής απόδοσης

3.2.2 Στρόβιλοι ακτινικής εισροής (Radial Inflow Turbines)

Οι στρόβιλοι ακτινικής εισροής (RIT) είναι μια κατηγορία στροβίλων που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε συστήματα ORC με τη γεωμετρία του στροβίλου να μετατρέπει αποτελεσματικά τους ατμούς υψηλής πίεσης σε ενέργεια περιστροφής. Σε ένα σύστημα RIT, το εργαζόμενο ρευστό, εισάγεται στον στρόβιλο σε υψηλή πίεση. Το ρευστό εισέρχεται στον στρόβιλο ακτινικά. Αυτό σημαίνει ότι η κατεύθυνση ροής του ρευστού είναι κάθετη στον άξονα περιστροφής του στροβίλου όταν εισέρχεται. Καθώς το ρευστό αλληλεπιδρά με τον ρότορα του στροβίλου, μεταδίδει την ενέργειά του στα πτερύγια του δρομέα ενώ παράλληλα εκτονώνεται. Αυτή η διαδικασία εκτόνωσης προκαλεί μείωση της πίεσης του ρευστού με αποτέλεσμα τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας και της ενέργειας πίεσης σε μηχανική ενέργεια [9].Ένα από χαρακτηριστικά των RIT είναι ότι καθώς το ρευστό κινείται μέσω του ρότορα, χάνει την εφαπτομενική του ταχύτητα – τη συνιστώσα ταχύτητας που ευθυγραμμίζεται με την περιστροφή των πτερυγίων. Αυτή η αλλαγή διεύθυνσης της ταχύτητας είναι σημαντική για την εξαγωγή μηχανικής ενέργειας από τη ροή του ρευστού. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των RIT είναι η ικανότητά τους να χειρίζονται μεγάλους λόγους πίεσης σε ένα μόνο στάδιο εκτόνωσης. Ο λόγος πίεσης αναφέρεται στην πίεση του ρευστού καθώς εισέρχεται στον στρόβιλο προς την πίεση κατά την έξοδο του. Τα συστήματα ORC συχνά περιλαμβάνουν υψηλούς λόγους πίεσης και τα RIT μπορούν να τα διαχειριστούν

αποτελεσματικά χωρίς να απαιτούν πολλαπλά στάδια στροβίλων, κάτι που είναι σημαντικό σε εφαρμογές όπου η ελαχιστοποίηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του στροβίλου είναι σημαντική όπως η εφαρμογή σε πλοία. Έτσι ο συμπαγής σχεδιασμός και η αποτελεσματικότητα των RIT τα καθιστούν ιδιαίτερα συμφέροντα για συστήματα ORC όπου ο χώρος είναι περιορισμένος ή όπου ο σχεδιασμός στοχεύει σε μια απλή, οικονομικά αποδοτική λύση.

3.2.3 Στρόβιλοι ακτινικής εκροής (Radial Outflow Turbines)

Οι στρόβιλοι ακτινικής εκροής (ROT) σε αντίθεση με τους στρόβιλους ακτινικής εισροής (RIT), έχουν ένα σύστημα ροής όπου το λειτουργικό ρευστό εισέρχεται αξονικά στο κέντρο του στροβίλου και κινείται προς τα έξω κατά την ακτινική κατεύθυνση. Καθώς το ρευστό κινείται από το κέντρο προς την περιφέρεια, εκτονώνεται και η ταχύτητά του αυξάνεται, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια σε μηχανική πιο αποτελεσματικά. Αυτή η κατεύθυνση της ροής είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της εξαγωγής ενέργειας από το εργαζόμενο ρευστό, καθώς επιτρέπει στον στρόβιλο να αξιοποιήσει την κινητική ενέργεια τόσο από την πίεση όσο και από τον αυξημένο όγκο του ατμού κατά την εκτόνωση. Τα συστήματα ROT είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν μεγάλες ογκομετρικές διαστολές του εργαζόμενου ρευστού καθώς η ακτινωτή διαδρομή παρέχει περισσότερο χώρο για τον διαστελλόμενο ατμό. Αυτή η ικανότητα είναι ζωτικής σημασίας στα συστήματα ORC, τα οποία συχνά χρησιμοποιούν οργανικά υγρά που παρουσιάζουν σημαντικές αυξήσεις στον όγκο. Η ικανότητα χειρισμού τέτοιων καταστάσεων εκτόνωσης μειώνει αποτελεσματικά τη μηχανική καταπόνηση στα εξαρτήματα του στροβίλου και ενισχύει τη συνολική ανθεκτικότητα και αξιοπιστία του συστήματος. Μία από τις κρίσιμες προκλήσεις στο σχεδιασμό του στροβίλου είναι η διαχείριση των απωλειών που σχετίζονται με τις υπερηχητικές ροές, οι οποίες μπορεί να προκύψουν όταν η ταχύτητα του ατμού υπερβαίνει την ταχύτητα του ήχου εντός του στροβίλου. Τα συστήματα ROT αντιμετωπίζουν αυτήν την πρόκληση επιτρέποντας στην περιοχή μέσω της οποίας ρέει το ρευστό να αυξηθεί καθώς κινείται ακτινικά προς τα έξω. Αυτός ο σχεδιασμός βοηθά στην επιβράδυνση της ροής και στη μείωση του σχηματισμού κρουστικών κυμάτων, τα οποία είναι κοινά στις υπερηχητικές ροές και μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές απώλειες ενέργειας. Ελαχιστοποιώντας αυτές τις απώλειες, τα ROT βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας μετατροπής ενέργειας, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας όπου είναι πιθανές οι υπερηχητικές ροές [11].

3.2.4 Κοχλιωτοί εκτονωτές (screw expanders)

Οι διατάξεις εκτόνωσης κοχλία είναι ένας τύπος διάταξης θετικής εκτοπίσεως ιδιαίτερα χρήσιμος σε συστήματα Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) λόγω των στιβαρών λειτουργικών χαρακτηριστικών τους. Οι παραπάνω εκτονωτικές διατάξεις χρησιμοποιούν δύο κοχλίες με ελικοειδή πλέγματα, τα οποία αλληλοσυνδέονται και εκτονώνουν το λειτουργικό ρευστό μεταξύ των σπειρωμάτων τους καθώς ρέει μέσα από αυτά. Στις διατάξεις αυτές, ο πρώτος κοχλίας κινείται ενεργά από την είσοδο υψηλής πίεσης του εργαζόμενου ρευστού. Ο κοχλίας αυτός με τη σειρά του, οδηγεί τον δεύτερο. Η περιστροφική κίνηση αυτών των κοχλιών μετατρέπει τη θερμική ενέργεια και την ενέργεια

πίεσης του ρευστού σε μηχανική ενέργεια. Η συνεχής και προοδευτική εμπλοκή των κοχλίων επιτρέπει μια σταθερή μετατροπή ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τους κραδασμούς που συναντώνται συνήθως σε άλλους τύπους διατάξεων εκτόνωσης.

Οι διατάξεις αυτές εκτιμώνται ιδιαίτερα για την ικανότητά τους να χειρίζονται αποτελεσματικά μια ποικιλία ρευστών διαφόρων φάσεων. Σε αντίθεση με τους στρόβιλους που γενικά απαιτούν ξηρό ή υπέρθερμο ατμό για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά, οι διατάξεις εκτόνωσης κοχλία μπορούν να επεξεργάζονται υγρά ή διφασικά μείγματα (όπου το ρευστό είναι εν μέρει υγρό και εν μέρει ατμός) χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απόδοσης ή πρόκληση βλάβης στο σύστημα. Αυτή η ικανότητα τα καθιστά εξαιρετικά κατάλληλα για εφαρμογές ORC, όπου η φάση του εργαζόμενου ρευστού μπορεί να μην ελέγχεται αυστηρά ή μπορεί να ποικίλλει λόγω αλλαγών στη είσοδο.

Η κατασκευή των διατάξεων screw τους επιτρέπει να είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί και αξιόπιστοι. Ο σχεδιασμός ελαχιστοποιεί την άμεση επίδραση του ρευστού σε κρίσιμα μηχανικά εξαρτήματα, μειώνοντας τη φθορά. Επιπλέον, η απλότητα του μηχανικού σχεδιασμού τους, που περιλαμβάνει κυρίως την περιστροφή των κοχλιών, περιορίζει τον αριθμό των κινούμενων μερών που εκτίθενται σε υψηλή καταπόνηση, ενισχύοντας έτσι τη συνολική διάρκεια ζωής και μειώνοντας τις απαιτήσεις συντήρησης.

Στα συστήματα ORC, όπου οι πηγές θερμότητας μπορεί συχνά να είναι μεταβλητές και μπορεί να μην παρέχουν πάντα θερμότητα «υψηλής ποιότητας», η ευελιξία των διατάξεων εκτόνωσης κοχλία, ο αποτελεσματικός χειρισμός διαφορετικών φάσεων των ρευστών εργασίας και η στιβαρή κατασκευή και αντοχή τους τα καθιστούν μια πλεονεκτική επιλογή [12].

3.2.5 Ελικοειδείς εκτονωτές (Scroll expanders)

Οι διατάξεις εκτόνωσης κυλίνδρων είναι ένας καινοτόμος τύπος διατάξεων εκτόνωσης θετικής μετατόπισης που χαρακτηρίζεται από τον ιδιαίτερο σχεδιασμό και μηχανισμό λειτουργίας τους. Αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούν δύο παρεμβαλλόμενες ελικοειδείς σπείρες: η πρώτη σπείρα είναι στερεωμένη και αγκυρωμένη με ασφάλεια στη θέση της, ενώ η άλλη είναι κινητή και περιστρέφεται γύρω από την πρώτη.

Καθώς το εργαζόμενο ρευστό εισέρχεται στον διαστολέα, παγιδεύεται μεταξύ των δύο κυλίνδρων. Ο κινούμενος κύλινδρος, μειώνει τον όγκο των θυλάκων μεταξύ των κυλίνδρων συμπιέζοντας προοδευτικά το ρευστό. Ο σχεδιασμός των διατάξεων εκτόνωσης κυλίνδρων επιτρέπει την ομαλή λειτουργία με λιγότερους κραδασμούς και θόρυβο σε σύγκριση με άλλους τύπους. Αυτό το χαρακτηριστικό τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές όπου ο θόρυβος και η ομαλότητα λειτουργίας είναι κρίσιμες. Επιπλέον, η σφιχτή συναρμογή μεταξύ των κυλίνδρων ελαχιστοποιεί τη διαρροή του εργαζόμενου ρευστού, βελτιώνοντας την απόδοση.

Οι διατάξεις αυτές είναι εξαιρετικά αποδοτικές και αξιόπιστες και είναι κατάλληλες για μια ποικιλία εφαρμογών, όπως συστήματα HVAC, τα οργανικά συστήματα κύκλου Rankine και ως μέρος μονάδων ανάκτησης ενέργειας σε αυτοκινητοβιομηχανίες και βιομηχανικές

εγκαταστάσεις. Η ικανότητά τους να χειρίζονται διαφορετικούς τύπους ρευστών εργασίας και να λειτουργούν αποτελεσματικά κάτω από διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης τα καθιστά επίσης ευέλικτα για εργασίες ανάκτησης ενέργειας και παραγωγής από «χαμηλής ποιότητας» ενέργειας.

3.3 Εναλλάκτες θερμότητας ORC

3.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά εναλλακτών θερμότητας ORC σε πλοία

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματικότητα των συστημάτων Organic Rankine Cycle (ORC) σε πλοία. Σε ένα σύστημα ORC, οι εναλλάκτες θερμότητας εφαρμόζονται σε διάφορα σημεία του κύκλου εκτελώντας κρίσιμες λειτουργίες. Ο ρόλος των εναλλακτών στο σύστημα ORC μπορεί να είναι:

- Εξατμιστήρας: Μεταφέρει θερμική ενέργεια από την πηγή θερμότητας (π.χ. καυσαέρια) στο οργανικό εργαζόμενο ρευστό, προκαλώντας την εξάτμισή του
- Συμπυκνωτής: Το ατμοποιημένο εργαζόμενο ρευστό διέρχεται μέσω του εκτονωτή ή του στροβίλου για να παράγει ισχύ και στη συνέχεια συμπυκνώνεται ξανά σε υγρό στον συμπυκνωτή. Η θερμότητα από το εργαζόμενο ρευστό μεταφέρεται σε ένα ψυκτικό μέσο, συνήθως θαλασσινό νερό ειδικότερα σε εφαρμογές σε πλοία.
- Αναγεννητής: Ορισμένα συστήματα ORC χρησιμοποιούν αναγεννητή για την ανάκτηση της υπολειπόμενης θερμότητας από το λειτουργικό ρευστό που εξέρχεται από τον εκτονωτή. Αυτή η ανακτώμενη θερμότητα προθερμαίνει το λειτουργικό ρευστό που εισέρχεται στον εξατμιστή, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος .

3.3.2 Τύποι εναλλακτών ORC

Η επιλογή του εναλλάκτη θερμότητας επηρεάζει τη συνολική απόδοση, το μέγεθος και το κόστος του συστήματος ORC, παράμετροι κρίσιμοι για την αποτελεσματική λειτουργία αυτών των συστημάτων σε πλοία. Ακολουθούν οι κύριοι τύποι εναλλάκτη θερμότητας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ORC, μαζί με τις συγκεκριμένες εφαρμογές και τα πλεονεκτήματά τους:

Πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας (Plate Heat Exchangers, PHE)

- Εναλλάκτες θερμότητας πλακών και πλαισίου (Plate-and-Frame Heat Exchangers) : Αυτοί οι εναλλάκτες αποτελούνται από πολλαπλές λεπτές, κυματοειδείς πλάκες που δημιουργούν κανάλια για τη ροή του υγρού. Οι πλάκες είναι διατεταγμένες σε ένα πλαίσιο, επιτρέποντας στα υγρά να ρέουν μέσω εναλλακτικών καναλιών. Οι εναλλάκτες θερμότητας πλακών και πλαισίου ευνοούνται για την υψηλή θερμική τους απόδοση και το συμπαγές μέγεθος τους, καθιστώντας τους ιδανικούς για

εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος, όπως σε πλοία [13]. Ο αρθρωτός σχεδιασμός τους επιτρέπει την εύκολη συντήρηση και την επεκτασιμότητα. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στο χειρισμό των απαιτήσεων του εξατμιστή και του συμπυκνωτή στα συστήματα ORC, όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος θερμοκρασίας και υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς θερμότητας [14].

- Εναλλάκτες θερμότητας συγκολλημένων πλακών (Brazed Plate Heat Exchangers, BPHEs): Αποτελούνται από μια σειρά από λεπτές πλάκες συγκολλημένες μεταξύ τους, δημιουργώντας μια συμπαγή και στιβαρή μονάδα που μπορεί να χειριστεί υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Τα BPHE είναι γνωστά για τους υψηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας και τις χαμηλές πτώσεις πίεσης, που ενισχύουν τη συνολική απόδοση του συστήματος ORC. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε τμήματα υψηλής πίεσης συστημάτων ORC, όπως εξατμιστές και συμπυκνωτές, όπου η ανθεκτικότητα και η απόδοση είναι κρίσιμες [15].

Συγκολλητοί πλακοειδείς εναλλάκτες (Shell-and-Tube Heat Exchangers)

Οι εναλλάκτες θερμότητας κελύφους- σωλήνα αποτελούνται από μια δέσμη σωλήνων που τοποθετούνται σταθερά μέσα σε ένα κυλινδρικό κέλυφος. Το ένα ρευστό ρέει μέσα από τους σωλήνες, ενώ το άλλο ρέει γύρω από τους σωλήνες μέσα στο κέλυφος. Αυτός ο σχεδιασμός είναι γνωστός για τη ανθεκτικότητά του και την ικανότητά του να χειρίζεται υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές. Στα συστήματα ORC σε πλοία, οι εναλλάκτες κελύφους - σωλήνα χρησιμοποιούνται συχνά όπου το επιτρέπει ο χώρος, όπως σε μεγαλύτερα πλοία ή βιομηχανικά περιβάλλοντα. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε εφαρμογές όπου υπάρχουν σημαντικές διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών [16].

Εναλλάκτες θερμότητας πτερυγίου σωλήνα (Fin-and-Tube Heat Exchangers)

Οι εναλλάκτες θερμότητας πτερυγίων σωλήνα αυξάνουν την επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας λόγω των πτερυγίων (fins) τα οποία συνδέονται στους σωλήνες. Αυτός ο τύπος εναλλάκτη θερμότητας είναι εξαιρετικά αποτελεσματικός όταν απαιτείται μεγάλη επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές όπου η μεγιστοποίηση της απόδοσης εναλλαγής θερμότητας είναι κρίσιμη. Στα συστήματα ORC, οι εναλλάκτες πτερυγίων και σωλήνων χρησιμοποιούνται συχνά σε στάδια προθέρμανσης και ψύξης, όπου η αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του κύκλου [14].

Εναλλάκτες θερμότητας μικροκαναλιού (Microchannel Heat Exchangers)

Οι εναλλάκτες θερμότητας μικροκαναλιού έχουν σχεδιαστεί με πολύ μικρά κανάλια που αυξάνουν σημαντικά την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Αυτοί οι εναλλάκτες είναι εξαιρετικά αποδοτικοί και συμπαγείς, καθιστώντας τους ιδανικούς για εφαρμογές περιορισμένου χώρου, όπως συστήματα ORC θαλάσσης. Προσφέρουν χαμηλές

πτώσεις πίεσης και υψηλούς συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση και απόδοση του συστήματος ORC.

Εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα (Double Pipe Heat Exchangers)

Οι παραπάνω εναλλάκτες αποτελούνται από έναν σωλήνα μέσα σε έναν άλλο, με ένα ρευστό να ρέει μέσω του εσωτερικού σωλήνα και ένα άλλο μέσω του δακτυλιοειδούς χώρου μεταξύ των σωλήνων. Οι εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα είναι απλοί και αποτελεσματικοί για εφαρμογές που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας. Συχνά χρησιμοποιούνται σε μικρότερα συστήματα ORC ή σε εφαρμογές όπου η συντήρηση και ο καθαρισμός πρέπει να είναι απλοί.

Η επιλογή υλικών για εναλλάκτες θερμότητας σε συστήματα ORC είναι κρίσιμη λόγω των σκληρών συνθηκών του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Υλικά όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, το τιτάνιο και τα κράματα νικελίου χρησιμοποιούνται συνήθως για την αντοχή τους στη διάβρωση. Χρησιμοποιούνται επίσης προηγμένες επιστρώσεις και επεξεργασίες επιφανειών για την παράταση της διάρκειας ζωής και της απόδοσης των εναλλάκτη θερμότητας σε αυτές τις απαιτητικές εφαρμογές [14].

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εναλλάκτη θερμότητας είναι εξαιρετικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων ORC σε εφαρμογές πλοίων. Κάθε τύπος εναλλάκτη θερμότητας προσφέρει πλεονεκτήματα και επιλέγεται βάσει συγκεκριμένων λειτουργικών απαιτήσεων, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών θερμοκρασίας, των συνθηκών πίεσης και των χωρικών περιορισμών. Τα προηγμένα υλικά και τα καινοτόμα σχέδια συνεχίζουν να ενισχύουν την αποτελεσματικότητα και την ανθεκτικότητα των εναλλάκτη θερμότητας σε αυτές τις κρίσιμες εφαρμογές.

3.4 Επιλογή του ρευστού εργασίας σε ORC

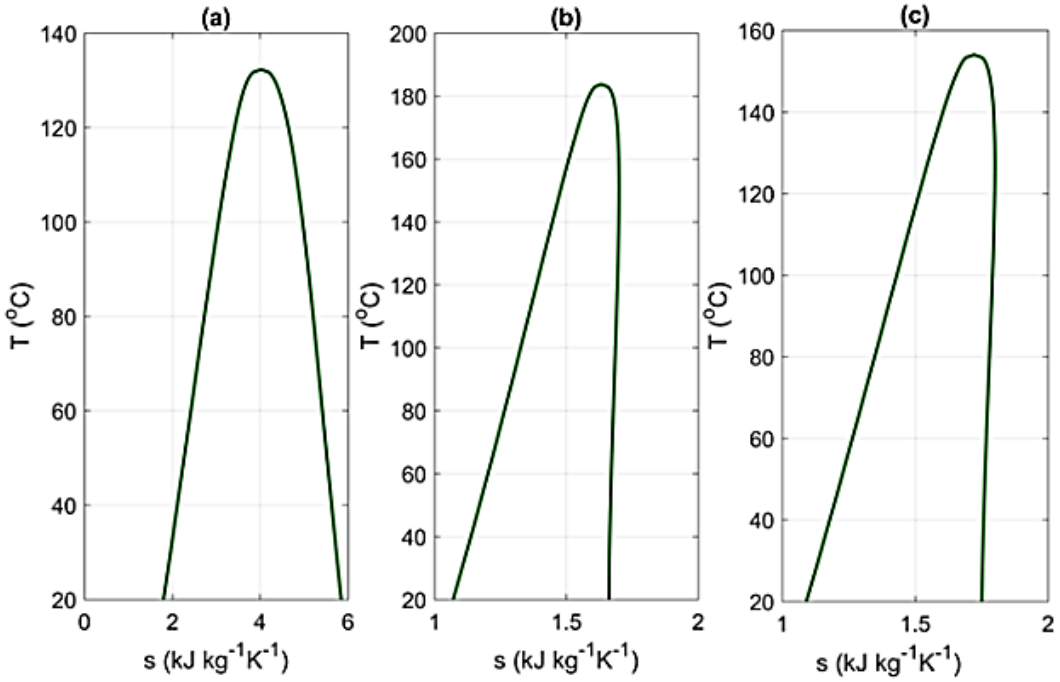
Μία από τις πιο κρίσιμες πτυχές του Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) είναι η επιλογή του εργαζόμενου ρευστού, καθώς επηρεάζει σημαντικά όχι μόνο την απόδοση του συστήματος αλλά και το εύρος λειτουργίας του όσον αφορά την πίεση και τη θερμοκρασία. Επομένως, ένας από τους κύριους παράγοντες που σχετίζονται με την επιλογή του εργαζόμενου ρευστού είναι η διαθέσιμη πηγή θερμότητας, η οποία καθορίζει πρωτίστως τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργεί ο κύκλος.

Τα εργαζόμενα ρευστά τυπικά ταξινομούνται σύμφωνα με την καμπύλη κορεσμού στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s). Αυτά με θετική κλίση αναφέρονται ως «ξηρά», αυτά με σχεδόν κάθετη καμπύλη ονομάζονται «ισεντροπικά» και, τέλος, αυτά με αρνητική κλίση περιγράφονται ως «υγρά». Το νερό εντάσσεται στην τελευταία κατηγορία, η οποία περιλαμβάνει κυρίως εργαζόμενα ρευστά με χαμηλό μοριακό βάρος. Πρόσφατη έρευνα δίνει έμφαση στη χρήση ξηρών και ισεντροπικών ρευστών για να αποφευχθεί η ανάγκη

υπερθέρμανσης, η οποία είναι απαραίτητη όταν χρησιμοποιούνται «υγρά» ρευστά για την πρόληψη της διάβρωσης του στροβίλου.

Τα «υγρά» ρευστά εργασίας που λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις χωρίς υπερθέρμανση οδηγούν σε αύξηση του ποσοστού της υγρής κατάστασης στα τελικά στάδια του στροβίλου. Όταν το μείγμα περιέχει μεγάλο ποσοστό υγρού, τα πτερύγια του στροβίλου διατρέχουν σημαντικό κίνδυνο διάβρωσης και μηχανικής φθοράς. Επομένως, η χρήση «υγρού» ρευστού εργασίας δεν συνιστάται χωρίς υπερθέρμανση.

Ένα τυπικό διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) που περιλαμβάνει και τους τρεις τύπους μέσων εργασίας που αναφέρονται παρουσιάζεται παρακάτω (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Διάγραμμα T-s για (α) υγρό, (β) ισεντροπικό και (γ) ξηρό εργαζόμενο ρευστό [17]

Η επιλογή του εργαζόμενου ρευστού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι μια κρίσιμη διαδικασία που καθορίζει τη συνολική απόδοση του κύκλου και το εύρος λειτουργίας του, καθορίζοντας έτσι την ικανότητα χρήσης του ενεργειακού περιεχομένου της διαθέσιμης πηγής θερμότητας. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του χρησιμοποιούμενου μέσου. Η καταστροφή της στιβάδας του όζοντος και η συμβολή του ψυκτικού ρευστού στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές συνέπειες.

Επιπλέον, μια άλλη κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ασφάλεια των εργαζόμενων ρευστών. Η τοξικότητα, η διαβρωτικότητα και η ευφλεκτότητα των

ψυκτικών θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη για να διασφαλίζεται η ασφάλεια των ανθρώπων και του εξοπλισμού σε περίπτωση διαρροής και να αποφεύγεται η πιθανότητα έκρηξης σε ατύχημα.

Η επιλογή του ρευστού εργασίας καθορίζει επίσης τον τύπο της διάταξης εκτόνωσης που είναι πιο κατάλληλος για την εφαρμογή, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη των εκτονωτικών διατάξεων, όπως οι κοχλιωτοί εκτονωτές μονού κοχλία που μπορούν να διαχειριστούν τη διφασική διαστολή ατμού-υγρού, επηρεάζει επίσης την επιλογή του εργαζόμενου ρευστού.

Αυτοί οι παράγοντες αντικατοπτρίζουν τις δυναμικές και σύνθετες εκτιμήσεις που εμπλέκονται στην επιλογή ενός εργαζόμενου ρευστού ORC, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις θερμοδυναμικές ιδιότητες, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις απαιτήσεις σχεδιασμού συστήματος.

Πίνακας 1: Συνήθη ρευστά εργασίας σε OCR και οι εφαρμογές τους

Εργαζόμενο Μέσο	Ιδιότητες	Κοινή Χρήση	Αναφορές
R134a	Μη τοξικό, μη εύφλεκτο, ευρέως διαθέσιμο	Χρησιμοποιείται σε συστήματα ORC μέσης προς χαμηλής θερμοκρασίας	[18]
R245fa	Καλή θερμική σταθερότητα, χαμηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση	Προτιμάται για εφαρμογές μέσης θερμοκρασίας	[18]
Τολουόλη	Υψηλή θερμική σταθερότητα, κατάλληλο για υψηλές θερμοκρασίες	Συνήθης σε εφαρμογές ORC υψηλής θερμοκρασίας	[19]
n-Πεντάνιο	Χαμηλό σημείο βρασμού, καλή εφαρμογή σε πηγές χαμηλής θερμοκρασίας	Συχνά χρησιμοποιείται σε γεωθερμικά συστήματα ORC	[19]
Ισοβουτάνιο	Εξαιρετικές θερμοδυναμικές ιδιότητες, μη τοξικό	Κατάλληλο για ORC που αξιοποιούν ανάκτηση απόβλητης θερμότητας	[18]

3.5 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Συστημάτων ORC.

Ακολουθούν 4 πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης συστημάτων ORC σε πλοία [20] [21]:

3.5.1 Πλεονεκτήματα :

1. Αύξηση απόδοσης: Τα συστήματα ORC μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των πλοίων χρησιμοποιώντας πηγές θερμότητας χαμηλής ποιότητας, όπως τα καυσαέρια του κινητήρα, για την παραγωγή πρόσθετης ισχύος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων και μείωση των εκπομπών.

2. Χαμηλό κόστος συντήρησης: Τα συστήματα ORC απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σύγκριση με άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας, επειδή διαθέτουν λιγότερα κινούμενα μέρη και απλούστερους σχεδιασμούς. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένο χρόνο διακοπής λειτουργίας και χαμηλότερο κόστος συντήρησης.

3. Μειωμένη ηχορύπανση: Τα συστήματα ORC παράγουν λιγότερο θόρυβο από τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την άνεση και την ασφάλεια του πληρώματος και των επιβατών στα πλοία.

4. Ευελιξία: Τα συστήματα ORC μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν εκ των υστέρων σε υπάρχοντα πλοία χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις, καθιστώντας τα μια πιο ευέλικτη επιλογή για τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων που επιθυμούν να βελτιώσουν την ενεργειακή τους απόδοση. Παρέχουν επίσης ευελιξία στη χρήση διαφόρων ρευστών για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος με βάση τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της πηγής θερμότητας.

3.5.2 Μειονεκτήματα:

1. Υψηλό αρχικό κόστος: Τα συστήματα ORC μπορεί να έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για την υιοθέτηση για ορισμένους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων.

2. Περιορισμένη απόδοση: Τα συστήματα ORC είναι λιγότερο αποδοτικά από τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας όσον αφορά την παραγωγή ισχύος ανά μονάδα εισερχόμενης θερμότητας. Αυτό μπορεί να περιορίσει την καταλληλότητά τους για εφαρμογές υψηλής ισχύος, όπως είναι μία ναυτική εφαρμογή σε ένα πλοίο υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων. Σε αυτό εστιάζεται η προσοχή μας στην συγκεκριμένη έρευν, ώστε να εξετάσουμε το κατά πόσο είναι εφικτές και ωφέλιμές τέτοιες εφαρμογές.

3. Απαιτήσεις χώρου: Τα συστήματα ORC απαιτούν πρόσθετο χώρο στα πλοία, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει πρόκληση για πλοία με περιορισμένο χώρο.

4. Απαιτήσεις συντήρησης: Παρόλο που τα συστήματα ORC απαιτούν λιγότερη συντήρηση από τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής ενέργειας, εξακολουθούν να απαιτούν τακτική συντήρηση και καθαρισμό για να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση και να αποτραπούν οι βλάβες του συστήματος.

5. Περιορισμοί θερμοκρασίας: Τα συστήματα ORC είναι συνήθως σχεδιασμένα για να λειτουργούν με πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την καταλληλότητά τους για χρήση σε πλοία που δεν έχουν πρόσβαση σε πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας.

4 Green House Gas Emissions.

Σε αυτήν την ενότητα θα αναλύσουμε με τη βοήθεια στοιχείων από τον Οργανισμό IEA, το μείζον πρόβλημα του φαινομένου του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα, πως αυτό επηρεάζεται αλλά και πως επιβαρύνεται απο την ναυτιλία. Με άλλα λόγια θα μελετήσουμε το «οικολογικό αποτύπωμα» των πλοίων παγκοσμίως και θα προσπαθησουμε να το βελτιστοποιησουμε. Διανύουμε μία περίοδο όπου η διασφάλιση αλλά και η αποκατάσταση πλέον, του περιβάλλοντος καθίσταται επιτακτική ανάγκη έως και μοναδική λύση.

4.1 Στοιχεία από Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA).

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Green House Gas, GHG), που αποτελούν κρίσιμο παράγοντα της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, προέρχονται κυρίως από την παραγωγή ενέργειας και τις βιομηχανικές διεργασίες. Η συσσώρευση αυτών των αερίων, ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), του μεθανίου (CH_4) και του υποξειδίου του αζώτου (N_2O), στην ατμόσφαιρα παγιδεύει θερμότητα και οδηγεί σε υπερθέρμανση του πλανήτη, η οποία με τη σειρά της έχει σοβαρές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές συνέπειες. Η κατανόηση των τάσεων και των πηγών αυτών των εκπομπών είναι απαραίτητη για τη διαμόρφωση αποτελεσματικών πολιτικών για το κλίμα και στρατηγικών μετριασμού.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην παρακολούθηση και την ανάλυση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκτενείς εκθέσεις του παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις πηγές, τις τάσεις και τις επιπτώσεις αυτών των εκπομπών, καθοδηγώντας τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους ερευνητές και το κοινό στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Σύμφωνα με τις πρόσφατες δημοσιεύσεις του IEA, το 2023 σηματοδότησε νέο υψηλό ρεκόρ για τις παγκόσμιες εκπομπές CO_2 που σχετίζονται με την ενέργεια, οι οποίες έφθασαν τους 37.4 Gt, αύξηση 1.1% από το προηγούμενο έτος. Αυτή η αύξηση υπογραμμίζει την επίμονη πρόκληση του περιορισμού των εκπομπών παρά τη σημαντική πρόοδο στις τεχνολογίες καθαρής ενέργειας.

Η παραγωγή ενέργειας παραμένει η μεγαλύτερη πηγή εκπομπών GHG, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 75% του παγκόσμιου συνόλου. Σε αυτόν τον τομέα, η καύση ορυκτών καυσίμων είναι ο κύριος παράγοντας, με τον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο να είναι οι κύριες πηγές. Το 2023, οι εκπομπές μόνο από τον άνθρακα ήταν υπεύθυνες για περισσότερο από το 65% της παγκόσμιας αύξησης των εκπομπών CO_2. Αυτή η συνεχιζόμενη εξάρτηση από τον άνθρακα, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, υπογραμμίζει την πολυπλοκότητα της μετάβασης σε καθαρότερες πηγές ενέργειας.

Ο τομέας των μεταφορών είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας εκπομπής ρύπων, ο οποίος συμβάλλει περίπου στο 14% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η καύση βενζίνης και ντίζελ στα οχήματα απελευθερώνει σημαντικές ποσότητες CO_2, καθώς και άλλους επιβλαβείς ρύπους όπως οξείδια του αζώτου (NOx) και σωματίδια (PM). Παρά τις εξελίξεις στην απόδοση καυσίμου και την αυξανόμενη υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων

(EV), οι εκπομπές από τον τομέα των μεταφορών συνεχίζουν να αυξάνονται, λόγω της αύξησης της ιδιοκτησίας οχημάτων και των διανυόμενων μιλίων, ειδικά στις αναδυόμενες οικονομίες.

Οι βιομηχανικές δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της μεταποίησης, της εξόρυξης και των κατασκευών, συμβάλλουν επίσης σημαντικά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 19% του παγκόσμιου συνόλου. Η παραγωγή τσιμέντου, χάλυβα και χημικών ουσιών περιλαμβάνει διεργασίες με υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια που εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες CO_2 και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Ενώ οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι βελτιώσεις στην απόδοση των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας έχουν συμβάλει στη μείωση της έντασης των εκπομπών σε ορισμένους κλάδους, οι συνολικές βιομηχανικές εκπομπές συνεχίζουν να αυξάνονται σύμφωνα με την οικονομική ανάπτυξη και την εκβιομηχάνιση.

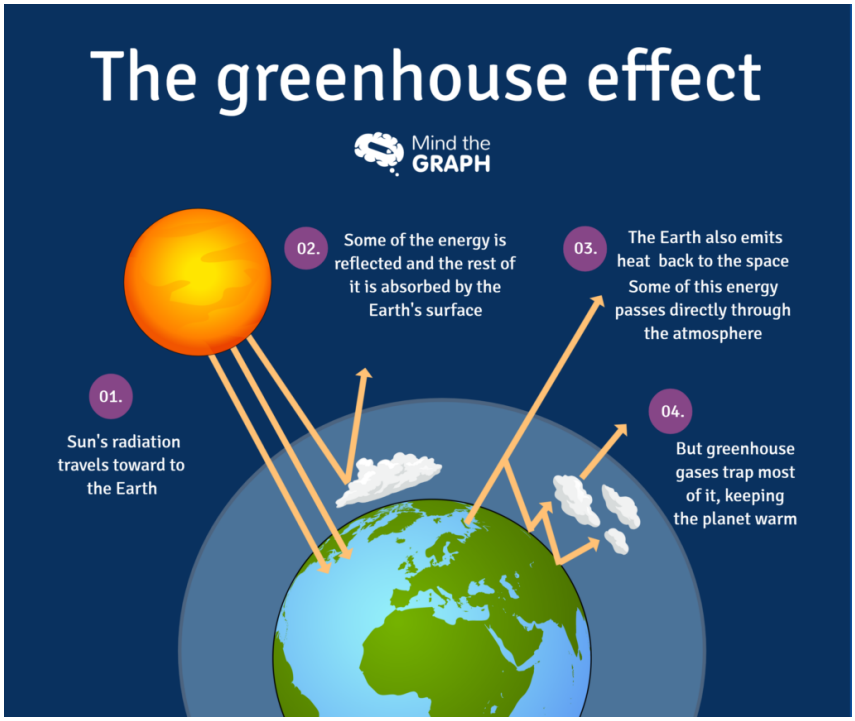
Τα οικιστικά και εμπορικά κτίρια ευθύνονται για περίπου το 6% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως από τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων θέρμανσης. Η ζήτηση για θέρμανση, ψύξη και ηλεκτρική ενέργεια στα κτίρια αυξάνεται, λόγω της πληθυσμιακής αύξησης, της αστικοποίησης και της αύξησης του βιοτικού επιπέδου. Παρόλο που τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης και η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν μετριάσει ορισμένες από τις εκπομπές από αυτόν τον τομέα, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά τον μετασκευασμό υφιστάμενων κτιρίων και την προώθηση βιώσιμων κατασκευαστικών πρακτικών.

Ο αγροτικός τομέας, αν και δεν σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή ενέργειας, είναι ένας αξιοσημείωτος εκπομπός μεθανίου (CH_4) και οξειδίου του αζώτου (N_2O), που ευθύνεται για το 10-12% περίπου των παγκόσμιων εκπομπών GHG. Η πέψη των ζώων (εντερική ζύμωση) και η διαχείριση της κοπριάς είναι σημαντικές πηγές CH_4, ενώ οι εκπομπές N_2O προκύπτουν από τη χρήση συνθετικών λιπασμάτων και την καλλιέργεια καλλιεργειών που δεσμεύουν το άζωτο. Η αντιμετώπιση των εκπομπών από τη γεωργία απαιτεί συνδυασμό βελτιωμένων γεωργικών πρακτικών, διατροφικών αλλαγών και ανάπτυξης βιώσιμων γεωργικών τεχνολογιών.

Ο μετριασμός των εκπομπών GHG είναι μια πολύπλευρη πρόκληση που απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Ο IEA τονίζει τον κρίσιμο ρόλο των τεχνολογιών καθαρής ενέργειας στη μείωση των εκπομπών. Η ταχεία ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, μαζί με την πρόοδο στην αποθήκευση ενέργειας, την ενεργειακή απόδοση και την ηλεκτροδότηση, έχει τη δυνατότητα να περιορίσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, το 2022, μόνο η ανάπτυξη ηλιακής φωτοβολταϊκής και αιολικής παραγωγής απέτρεψε περίπου 465 Mt εκπομπών CO_2.

Τα μέτρα πολιτικής διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ώθηση της μετάβασης σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι κυβερνητικές πρωτοβουλίες, όπως ο νόμος για

τη μείωση του πληθωρισμού στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν επιταχύνει την υιοθέτηση τεχνολογιών καθαρής ενέργειας και έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των εκπομπών. Η διεθνής συνεργασία και συμφωνίες, όπως η Συμφωνία του Παρισιού, παρέχουν επίσης ένα πλαίσιο για παγκόσμια δράση για την κλιματική αλλαγή. Αυτές οι πολιτικές όχι μόνο δίνουν κίνητρα για την υιοθέτηση καθαρών τεχνολογιών αλλά και διευκολύνουν τη σταδιακή κατάργηση των αναποτελεσματικών και ρυπογόνων περιουσιακών στοιχείων



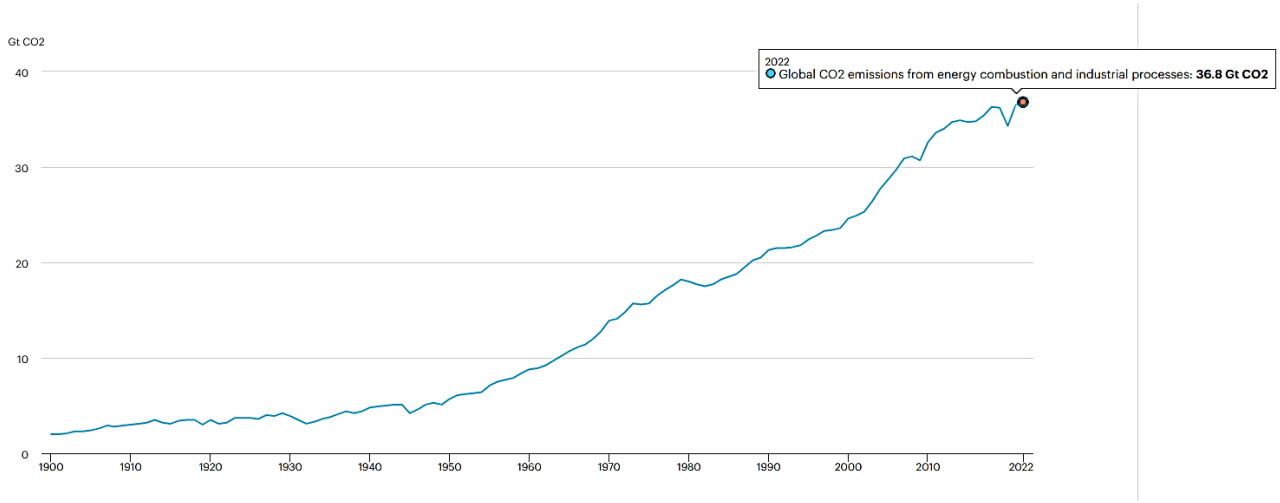
Εικόνα 4 Γραφική αναπαράσταση του φαινόμενου του θερμοκηπίου.

4.2 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

4.2.1 Τρέχουσες καταγραφές

Η ανάλυση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency, IEA) για το 2022 αποκαλύπτει ένα πολύπλευρο σενάριο παγκόσμιων εκπομπών CO_2 στο πλαίσιο της ανάκαμψης της παγκόσμιας οικονομίας και της κλιμακούμενης υιοθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι παγκόσμιες εκπομπές CO_2 από την καύση πηγών ενέργειας και τις βιομηχανικές διεργασίες παρουσίασαν μικρή αύξηση 0.9%, φτάνοντας τους 36.8 Gt. Αυτή η τιμή όμως αποτελεί ιστορικό ρεκόρ καταγραφών εκπομπών CO_2 όπως φαίνεται και στη Εικόνα 8, κάτι που την χαρακτηρίζει ως ιδιαίτερη κρίσιμη στο πλαίσιο της προσπάθειας μείωσης των εκπομπών. Η αύξηση αυτή, αν και χαμηλότερη από ό,τι αναμενόταν,

ενισχύθηκε από σημαντικές ανακάμψεις σε τομείς όπως η αεροπλοΐα και η επιστροφή προς τη χρήση άνθρακα, ιδιαίτερα στην Ασία, λόγω της παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης [22].



Εικόνα 5: Παγκόσμιες εκπομπές CO_2 από την καύση πηγών ενέργειας και τις βιομηχανικές διεργασίες, 1900-2022 [22]

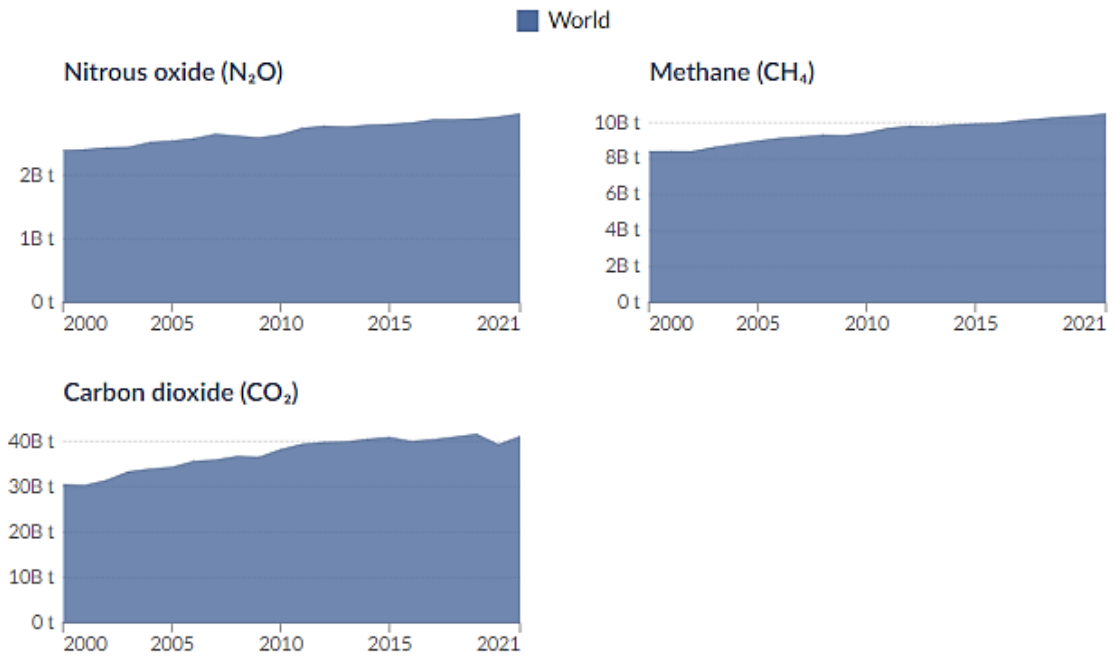
Σε περιφερειακό επίπεδο, το τοπίο των εκπομπών διέφερε, αντανακλώντας αποκλίνουσες οικονομικές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Στην Κίνα, οι εκπομπές παρέμειναν σχετικά σταθερές, μειώθηκαν μόλις κατά 0.2%, χάρη στον συνδυασμό της φθίνουσας κατασκευαστικής δραστηριότητας και των αυστηρών μέτρων για τον COVID-19 που μετρίασαν τις βιομηχανικές εκπομπές και τις εκπομπές από το τομέα των μεταφορών μεταφορών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση σημείωσε μείωση 2.5% στις εκπομπές CO_2, ως συνάρτηση των ήπιων κλιματολογικών συνθηκών κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών και την αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, σηματοδοτώντας μια σημαντική μετάβαση προς καθαρότερη ενέργεια. Οι Ηνωμένες Πολιτείες, από την άλλη πλευρά, καταγράφουν ελαφρά αύξηση των εκπομπών κατά 0.8%, που οφείλεται κυρίως στις αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις για ψύξη και θέρμανση λόγω ακραίων θερμοκρασιών [22].

Η αύξηση των εκπομπών μετριάστηκε σημαντικά από την επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας, η οποία αντιπροσώπευε το 90% της παγκόσμιας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη τεχνολογιών καθαρής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicles, EV) και των αντλιών θερμότητας, παράλληλα με τις βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση, διαδραμάτισε κρίσιμο ρόλο στην αποτροπή πιθανού τριπλασιασμού των αυξήσεων των εκπομπών.

Η ίδια έκθεση υπογραμμίζει την επίμονη πρόκληση της μείωσης της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα. Παρά τις προόδους στην καθαρή ενέργεια, οι εκπομπές από άνθρακα και πετρέλαιο συνεχίζουν να αυξάνονται, με τις εκπομπές άνθρακα να αυξάνονται κατά 1.6% και τις εκπομπές πετρελαίου κατά 2.5%, σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις τψν προηγούμενων ετών. Αυτή η καταγραφή υπογραμμίζει την επείγουσα ανάγκη για εντατικές προσπάθειες για την επιτάχυνση της μετάβασης στην καθαρή ενέργεια για τον περιορισμό της μη βιώσιμης τροχιάς της υπερθέρμανσης του πλανήτη και την επίτευξη των ενεργειακών και κλιματικών στόχων του κόσμου [22].

Η έκθεση Emissions Gap Report του 2023 από το Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον (UNEP) υπογραμμίζει την κρίσιμη συγκυρία στην οποία βρίσκονται οι παγκόσμιες προσπάθειες για τον περιορισμό των εκπομπών GHG. Παρά την πρόοδο που σημειώθηκε από τη Συμφωνία του Παρισιού, οι προβλεπόμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου το 2030 εξακολουθούν να είναι σε τιμές που συνδέονται με επαπειλούμενη αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από τους στόχους της Συμφωνίας. Η έκθεση τονίζει την ανάγκη για τα έθνη να υπερβούν τις τρέχουσες δεσμεύσεις τους και να επιταχύνουν τις δραστηριότητες μετάβασης. Επισημαίνει τις δυνατότητες των μεθόδων αφαίρεσης διοξειδίου του άνθρακα και τονίζει την επείγουσα ανάγκη για την επίτευξη των στόχων μείωσης της θερμοκρασίας 2 °C και 1.5 °C στα επόμενα χρόνια [23].

Ο οργανισμός Our World in Data παρέχει μια επισκόπηση του τρόπου ποσοτικοποίησης των εκπομπών GHG, χρησιμοποιώντας ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO_{2e}) για να ληφθούν υπόψη οι ποικίλες επιπτώσεις διαφορετικών αερίων όπως το μεθάνιο και το οξείδιο του αζώτου στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Αυτή η μέτρηση, η οποία εξετάζει το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) σε μια τυπική χρονική κλίμακα 100 ετών, υπογραμμίζει την πολυπλοκότητα της σύγκρισης των επιπτώσεων της θέρμανσης διαφορετικών GHG και υπογραμμίζει τις συνεχιζόμενες συζητήσεις γύρω από τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών μείωσης GHG [24]



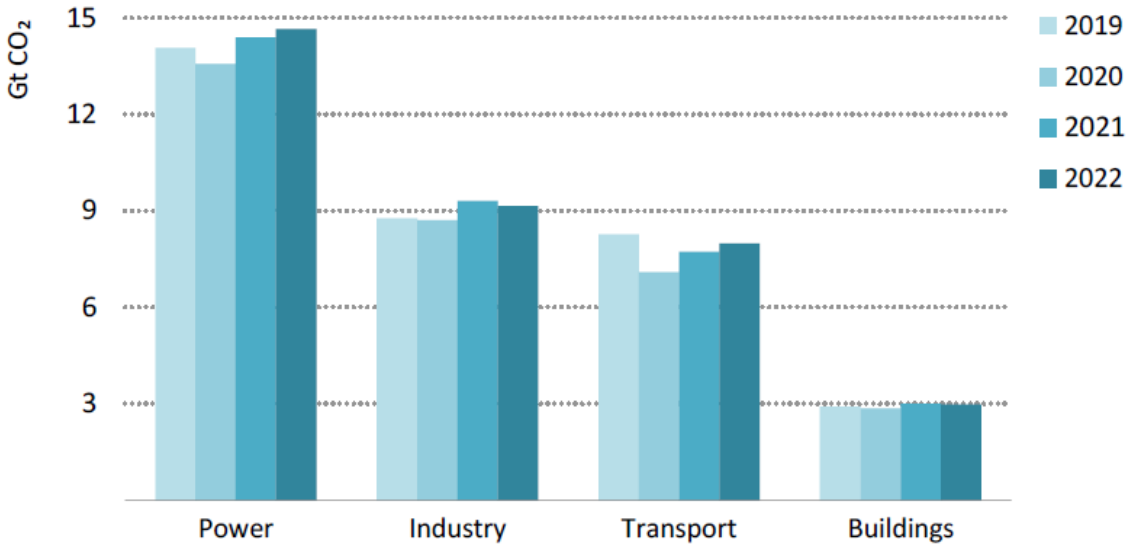
Εικόνα 6: Παγκόσμιες εκπομπές αερίων θερμοκηπίων ανά είδος από το 2000 έως το 2021 [24]

4.2.2 Επιμερισμός εκπομπών στους τομείς δραστηριότητας

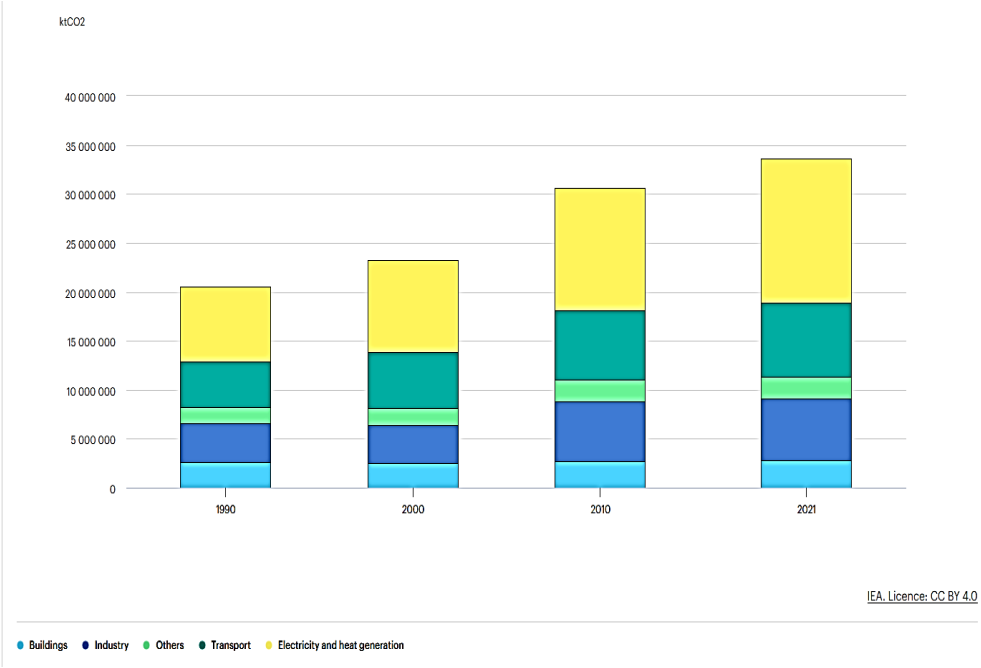
Η κατανομή των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2022 σε διάφορους τομείς αποκαλύπτει την εικόνα του παγκόσμιου ενεργειακού τοπίου. Ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας, που περικλείει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, παραμένει ο μεγαλύτερος σε συνεισφορά, με τις εκπομπές να αυξάνονται κατά 1.8% φτάνοντας στο ιστορικό υψηλό των 14.6 Gt. Αυτή η αύξηση τροφοδοτήθηκε κυρίως από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα, ιδιαίτερα στις ασιατικές οικονομίες, αντισταθμίζοντας ορισμένες μειώσεις στις εκπομπές που προήλθαν από τη χρήση φυσικού αερίου.

Ο τομέας των μεταφορών το 2022 είχε εκπομπές κοντά στα επίπεδα του 2019, με αύξηση άνω των 250 εκατομμυρίων τόνων και ποσότητα εκπομπών σχεδόν 8 Gt. Η αύξηση αυτή αντιστοιχεί περίπου σε 3% περισσότερο από το 2021. Οι αερομεταφορές αντιπροσώπευαν σημαντικό μέρος αυτής της αύξησης καθώς τα αεροπορικά ταξίδια ανέκαμψαν από την περίοδο της πανδημίας (2019-2020). Ωστόσο, η αύξηση των εκπομπών μετριάστηκε από την αυξανόμενη δυναμική των ηλεκτρικών οχημάτων (EV), η οποία έφτασε τα 10 εκατομμύρια αυτοκίνητα που πωλήθηκαν παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το 14% όλων των πωλήσεων αυτοκινήτων το 2022. Αυτή η στροφή προς την ηλεκτρικοκίνηση είναι ενδεικτική του μετασχηματισμού στον τομέα των μεταφορών, τονίζοντας τη δυνατότητα των ηλεκτρικών οχημάτων να συμβάλουν σημαντικά στην προσπάθεια μείωσης των GHG στις μεταφορές [22].

Αντίθετα, ο τομέας των κτιρίων και των κατασκευών παρουσίασε αύξηση των εκπομπών CO_2. Οι εκπομπές CO_2 από τις κτιριακές δραστηριότητες έφθασαν σε νέα αιχμή, σημειώνοντας αύξηση 5% από το 2020 και 2% αύξηση από την προηγούμενη αιχμή το 2019.. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο τομέας των κτιρίων γνώρισε την πιο απότομη άνοδο στις εκπομπές, που αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στις ακραίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που διεγείρουν τις απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης [25]. Αυτή η τάση καταδεικνύει τις σημαντικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κλάδος όσον αφορά την ευθυγράμμιση με τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού και την επείγουσα ανάγκη για βελτιωμένα μέτρα στην λειτουργία των κτιρίων, των εγκαταστάσεων και των κατασκευών.



Εικόνα 7: Παγκόσμιες εκπομπές CO_2 ανά τομέα (2019-2022) [22]



Εικόνα 8: Παγκόσμιες εκπομπές CO_2 από διάφορους τομείς δραστηριότητας για τα έτη 1990, 2000, 2010 και 2021 [26].

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (ΔΟΕ), οι παγκόσμιες ναυτιλιακές εκπομπές το 2021 αναμενόταν να φθάσουν περίπου τους 1.050 εκατομμύρια μετρικούς τόνους CO2. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου το 2,5% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών, γεγονός που την καθιστά σημαντικό παράγοντα που συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή. Η ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί ζωτικό μέρος της παγκόσμιας οικονομίας, καθώς μεταφέρει περίπου το 80% του διεθνούς εμπορίου σε όγκο.

Ωστόσο, η ενεργειακή ένταση της ναυτιλίας έχει αυξηθεί κατά την τελευταία δεκαετία, λόγω ενός συνδυασμού παραγόντων όπως η οικονομική ανάπτυξη, το αυξημένο παγκόσμιο εμπόριο και η στροφή προς μεγαλύτερα πλοία. Το 2021, η πλειονότητα των ναυτιλιακών εκπομπών αναμενόταν να προέρχεται από τη μεταφορά εμπορευμάτων, με περίπου 55% να προέρχεται από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και 45% από πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου. Ωστόσο, σημαντική είναι και η συμβολή των επιβατηγών πλοίων, με περίπου 10% των εκπομπών να προέρχεται από κρουαζιερόπλοια και οχηματαγωγά πλοία.

Ο ναυτιλιακός τομέας έχει μακροχρόνια δέσμευση για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα και τα τελευταία χρόνια έχουν αναληφθεί αρκετές πρωτοβουλίες για την ενθάρρυνση της υιοθέτησης τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών.

Σε αυτές περιλαμβάνεται ο στόχος του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2020, ο οποίος αποσκοπεί στη μείωση των ναυτιλιακών εκπομπών κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα

του 2008. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η ναυτιλιακή βιομηχανία εξετάζει μια σειρά επιλογών, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων, όπως τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο και η αμμωνία, καθώς και της υιοθέτησης ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών, όπως ο προηγμένος σχεδιασμός του κύτους και οι έλικες.

Μία από τις βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι η έλλειψη υποδομών για την υποστήριξη της υιοθέτησης αυτών των τεχνολογιών. Ενώ έχουν καταβληθεί ορισμένες προσπάθειες για τη βελτίωση της διαθεσιμότητας καυσίμων χαμηλών εκπομπών, εξακολουθεί να υπάρχει σημαντικό κενό στην αγορά, ιδίως για τα εναλλακτικά καύσιμα όπως το υδρογόνο και η αμμωνία.

Εκτός από την έλλειψη υποδομών, υπάρχουν και οικονομικά εμπόδια στην υιοθέτηση τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών. Πολλές ναυτιλιακές εταιρείες διστάζουν να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες λόγω του υψηλού αρχικού κόστους και της αβέβαιης απόδοσης της επένδυσης. Παρά τις προκλήσεις αυτές, η ναυτιλιακή βιομηχανία σημειώνει πρόοδο προς τη μείωση των εκπομπών της.

Το 2021, η χρήση καυσίμων χαμηλών εκπομπών αναμενόταν να αυξηθεί, με περίπου 5% των ναυτιλιακών εκπομπών να προέρχεται από τη χρήση βιοκαυσίμων, υδρογόνου και αμμωνίας. Αυτό αντιπροσωπεύει σημαντική αύξηση σε σχέση με τα προηγούμενα έτη και αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται τα επόμενα χρόνια.

Η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία διερευνά επίσης τη χρήση τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (CCS) για τη μείωση των εκπομπών της. Η CCS περιλαμβάνει τη δέσμευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την υπόγεια αποθήκευσή τους, αντί της απελευθέρωσής τους στην ατμόσφαιρα. Αν και η CCS βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τις ναυτιλιακές εκπομπές στο μέλλον.

Συνολικά, η ναυτιλιακή βιομηχανία σημειώνει πρόοδο προς τη μείωση των εκπομπών της, αλλά υπάρχει ακόμη πολύς δρόμος να διανυθεί. Ενώ πρωτοβουλίες όπως ο στόχος του IMO για το 2020 είναι ενθαρρυντικές, περισσότερες δράσεις είναι αναγκαίες ώστε να επιταχυνθεί η υιοθέτηση τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών και να αντιμετωπιστούν τα εμπόδια υποδομής και χρηματοδότησης που εμποδίζουν σήμερα την ευρύτερη υιοθέτηση.

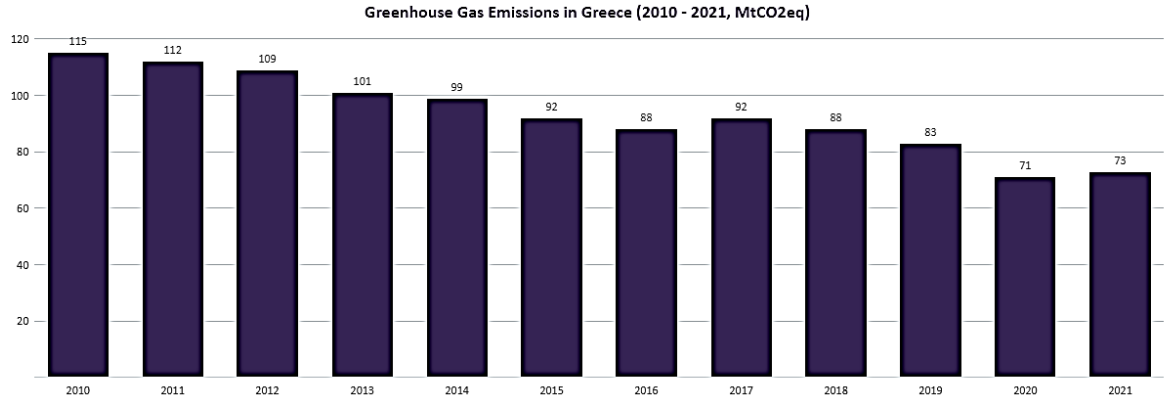
4.2.3 Επισκόπηση εκπομπών σε Ε.Ε. και Ελλάδα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση βρίσκεται στην πρώτη γραμμή των παγκόσμιων προσπαθειών για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Μέχρι το 2019, η ΕΕ-27 είχε επιτύχει αξιοσημείωτη μείωση κατά 24% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Αυτή η πρόοδος αποδίδεται σε μια πολύπλευρη προσέγγιση που περιλαμβάνει πολιτικές τόσο σε επίπεδο ΕΕ όσο και εθνικό για κάθε κράτος, αυξημένη εξάρτηση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στρατηγική στροφή από τον άνθρακα στο φυσικό αέριο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, βελτιώσεις στην ενεργειακή

απόδοση και σημαντικές διαρθρωτικές αλλαγές στις οικονομίες της ΕΕ. Αυτές οι προσπάθειες έχουν τοποθετήσει την ΕΕ να υπερβεί σημαντικά τον στόχο μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου για το 2020, στοχεύοντας σε καθαρή μείωση κατά 55% έως το 2030 και επιδιώκοντας την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050 [27].

Η Ελλάδα έχει χαράξει μια πορεία προς τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ευθυγραμμίζοντας τις εθνικές της πολιτικές με τους στόχους της ΕΕ. Το στρατηγικό πλαίσιο της χώρας, που περιλαμβάνεται στο Εθνικό Σχέδιο Ενέργειας και Κλίματος (NECP) και στον Εθνικό Νόμο για το Κλίμα του 2022, θέτει φιλόδοξους στόχους: μείωση 55% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2030, 80% έως το 2040 και επίτευξη καθαρών μηδενικών εκπομπών έως το 2050. Αυτοί οι στόχοι υποστηρίζονται από βασικές στρατηγικές, συμπεριλαμβανομένης της ταχείας κατάργησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη έως το 2028, μιας αξιοσημείωτης στροφής προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μιας ολοκληρωμένης σειράς μέτρων που στοχεύουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε διάφορα τομείς [28].

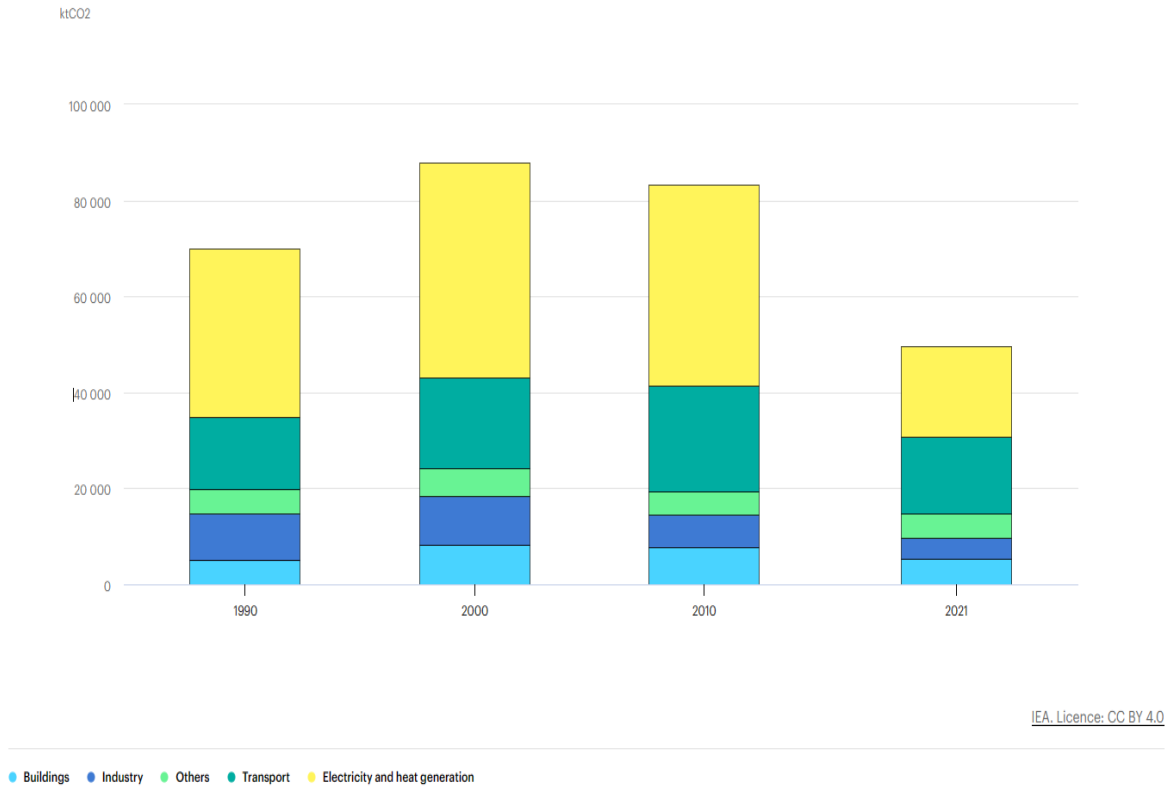
Την περίοδο από το 2010 έως το 2021, η Ελλάδα κατέγραψε μείωση 36,7% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, επιτυγχάνοντας επίπεδο εκπομπών 73 Mt $CO_{2,eq}$ το 2021. Παρά τη συνολική αυτή πτωτική τάση, σημειώθηκε αύξηση 3,2% στις εκπομπές ρύπων το 2021 , τονίζοντας τις συνεχιζόμενες προκλήσεις όσον αφορά τη διατήρηση σταθερών μειώσεων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [29].



Εικόνα 9: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην Ελλάδα (2010-2021) [29]

Ο ενεργειακός τομέας, που παραδοσιακά κυριαρχείται από λιγνίτη και άλλα ορυκτά καύσιμα, υπήρξε σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η ενεργειακή μετάβαση της Ελλάδας, που χαρακτηρίζεται από τη μετάβαση από τον λιγνίτη στο φυσικό αέριο και την αυξημένη ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή, υπήρξε καθοριστική για τη μείωση της έντασης άνθρακα του ενεργειακού εφοδιασμού της. Ο τομέας των μεταφορών υφίσταται επίσης μετασχηματισμό, με πολιτικές που επικεντρώνονται στη μείωση της ζήτησης πετρελαίου, στην προώθηση της ανάμειξης βιοκαυσίμων και στην ενθάρρυνση της υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων. Στον κτιριακό τομέα, η Ελλάδα εφαρμόζει πολιτικές για τη σταδιακή κατάργηση της θέρμανσης με καύση πετρελαίου και την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων μέσω ανακαινίσεων και υιοθέτησης αποδοτικών τεχνολογιών θέρμανσης, ψύξης και συσκευών [28].

Σύμφωνα με στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (ΔΟΕ), η Ελλάδα έχει σημαντική παρουσία στη ναυτιλιακή βιομηχανία, καταλαμβάνοντας την πέμπτη θέση μεταξύ των κρατών σημαίας (με βάση την ολική χωρητικότητα) στον κόσμο το 2020. Η χώρα φιλοξενεί πολλές μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες και έχει μακρά ιστορία στον κλάδο.



Εικόνα 10: Εκπομπές CO2 ανά κατηγορία στην Ελλάδα [26]

Η Ελλάδα συμμετέχει ενεργά στις προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών της ναυτιλίας και έχει εφαρμόσει μια σειρά μέτρων για την αύξηση της αποδοτικότητας του ναυτιλιακού της στόλου. Αυτά περιλαμβάνουν επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες, όπως κυψέλες καυσίμου και υβριδικούς κινητήρες, προώθηση της χρήσης καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και υποστήριξη της ανάπτυξης υποδομών για εναλλακτικά καύσιμα.

Η Ελλάδα έχει επίσης υπογράψει την αρχική στρατηγική του IMO για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία, η οποία περιγράφει μια σειρά μέτρων που μπορούν να λάβουν οι χώρες για τη μείωση των εκπομπών από τον τομέα της ναυτιλίας. Σε αυτά περιλαμβάνονται η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, η προώθηση της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων και η υποστήριξη της έρευνας και ανάπτυξης νέων τεχνολογιών.

4.3 Τρέχουσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στη Ναυτιλία

Ο ναυτιλιακός τομέας, αναπόσπαστο μέρος του παγκόσμιου εμπορίου και των μεταφορών, έχει καταγράψει σημαντική αύξηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) τα τελευταία χρόνια. Η αύξηση αυτή αποδίδεται κυρίως στην ταχεία ανάπτυξη του κλάδου, στην εξάρτηση από καύσιμα μεγάλης έντασης εκπομπών άνθρακα και στον τεράστιο όγκο των παγκόσμιων ναυτιλιακών δραστηριοτήτων.

Οι εκπομπές από τη ναυτιλιακή βιομηχανία επηρεάζονται από τους τύπους καυσίμων και την απόδοση των κινητήρων. Τα διαφορετικά καύσιμα έχουν ως αποτέλεσμα ποικίλες εκπομπές όπως CO_2, SO_x, NO_x και μεθανίου. Το 2015, από περίπου 300 εκατομμύρια μετρικούς τόνους παγκόσμιας κατανάλωσης θαλάσσιων καυσίμων, το 72% αποτελούνταν από υπολειμματικά καύσιμα (π.χ. βαρύ μαζούτ, HFO), το 26% ήταν αποστάγματα (π.χ. αέριο (LNG) [30]. Το HFO περιέχει συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε θείο και η διεθνής ναυτιλία συνέβαλε στο 13% των παγκόσμιων εκπομπών SOx το 2012 ετησίως [31]. Το 2009, τα 15 μεγαλύτερα πλοία προκάλεσαν περισσότερη ρύπανση από θείο από ό,τι ολόκληρος ο παγκόσμιος στόλος αυτοκινήτων (760 εκατομμύρια αυτοκίνητα) μαζί [32].

Τα καύσιμα απόσταξης όπως το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης (MGO) και το πετρέλαιο ντίζελ πλοίων (MDO) έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο, αλλά οι εκπομπές GHG και NOx που προκύπτουν από την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να είναι παρόμοιες.

Ο ναυτιλιακός τομέας αντιπροσώπευει περίπου το 2,8% έως 3% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία, με αξιοσημείωτη αύξηση των εκπομπών ανά ναυτικό μίλι κατά τη διάρκεια της πλεύσης στον ωκεανό. Αυτή η άνοδος μπορεί να αποδοθεί σε παράγοντες όπως οι αλλαγές στα πρότυπα του διεθνούς εμπορίου, συμπεριλαμβανομένης της περιφερειοποίησης των μεταφορών [26].

Επιπλέον οι ωριαίες εκπομπές κατά τις λιμενικές δραστηριότητες παρουσίασαν διακυμάνσεις, με άνοδο μεταξύ 2016 και 2019, ακολουθούμενη από μείωση από το 2019 έως το 2020. Αυτή η τάση συνδέεται με λειτουργικές ανεπάρκειες και την αναντιστοιχία μεταξύ της χωρητικότητας των λιμένων και της επιχειρησιακής ζήτησης [33].

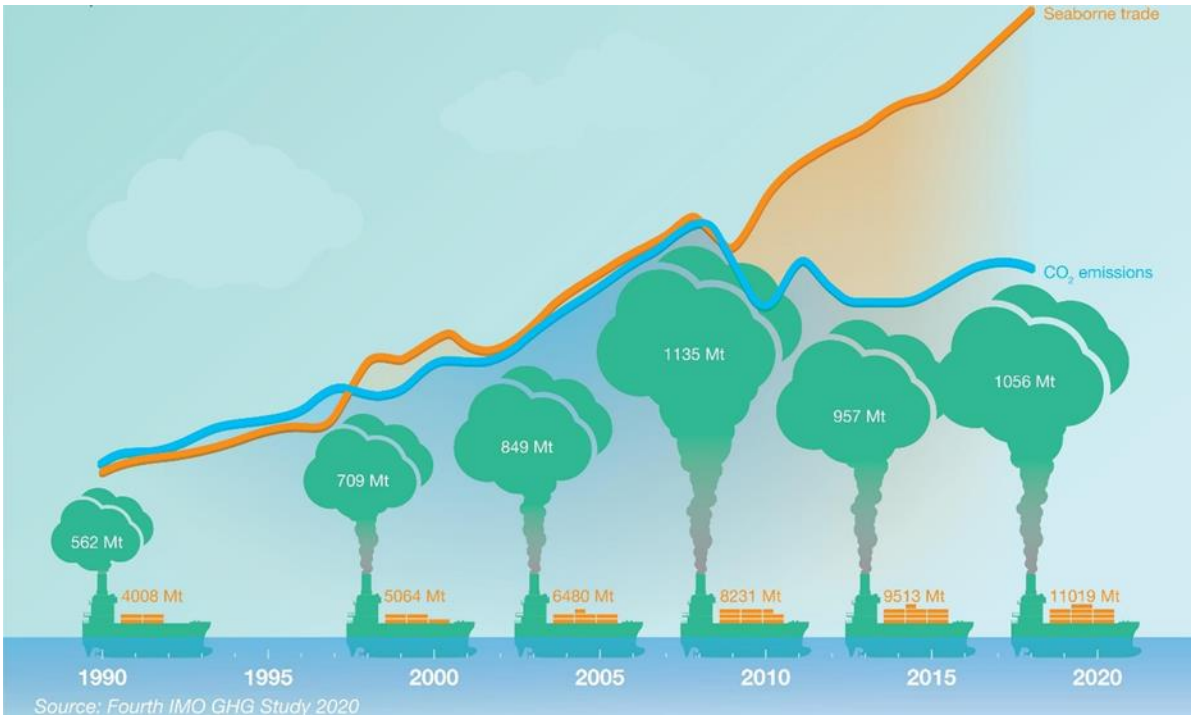
Τα λιμάνια της Ασίας, ιδιαίτερα η Κίνα και οι Ηνωμένες Πολιτείες, είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί εκπομπών από τις μεταφορές εμπορευματοκιβωτίων κατά τις λιμενικές δραστηριότητες, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 55% του παγκόσμιου συνόλου.

Η αύξηση της εμπορικής ζήτησης, ειδικά στην Ασία, η οποία αντιπροσωπεύει το 41% όλων των εμπορευμάτων που φορτώνονται, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αύξηση των εκπομπών σε αυτά τα λιμάνια [33].

Ιστορικά, πάνω από το 99% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης για τη διεθνή ναυτιλία έχει καλυφθεί από προϊόντα πετρελαίου. Το 2022, τα βιοκαύσιμα αντιπροσώπευαν λιγότερο από το 0,5% της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας από τη ναυτιλία [26].

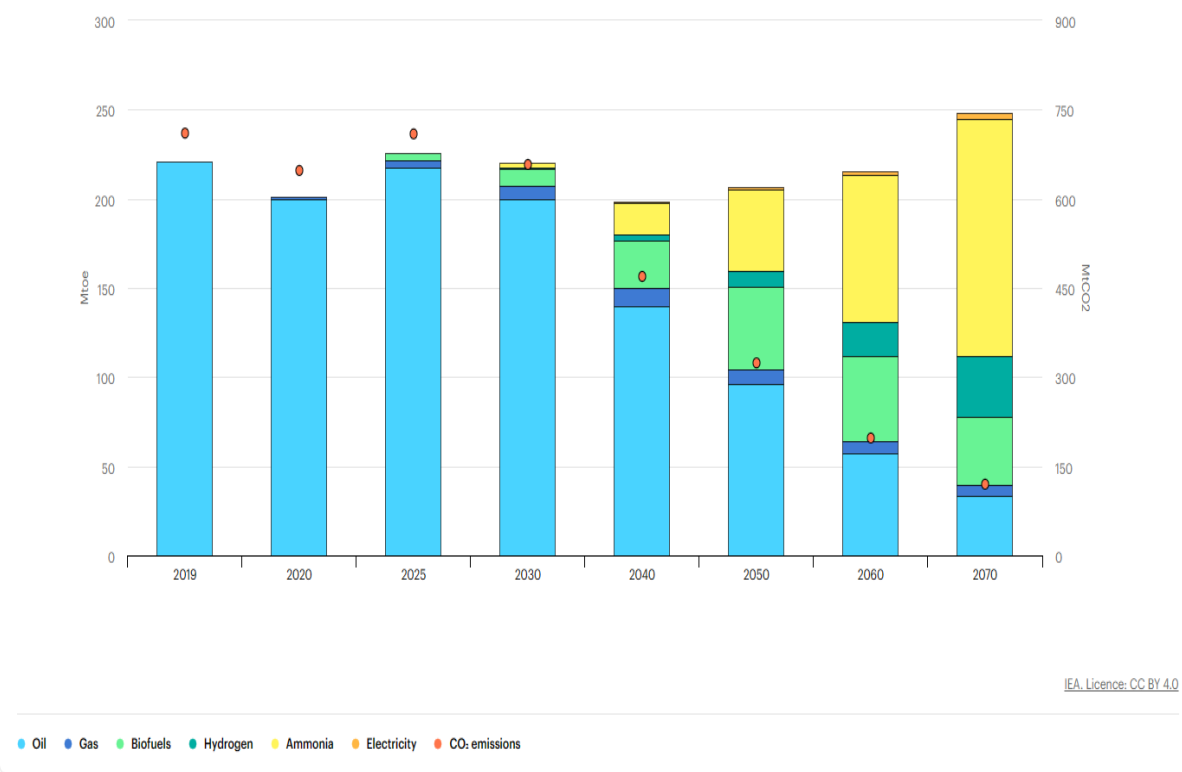
Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εφαρμόσει τον κανονισμό παρακολούθησης, αναφοράς και επαλήθευσης (MRV) από το 2018, ο οποίος απαιτεί από τα μεγάλα πλοία να παρακολουθούν και να αναφέρουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ο κανονισμός

MRV ήταν ένα βασικό βήμα πριν από την ένταξη των θαλάσσιων εκπομπών στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS).



Εικόνα 11: Εξέλιξη εκπομπών CO2 από τη ναυτιλία και θαλάσσιου εμπορίου (1990-2020) [34]

Η εικόνα παρουσιάζει τις εκπομπές CO_2 από τη ναυτιλία σε εκατομμύρια τόνους (Mt) και τον όγκο θαλάσσιου εμπορίου σε εκατομμύρια τόνους (Mt) για τα έτη 1990 έως 2020. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει τις εκπομπές CO_2, ενώ η πορτοκαλί γραμμή δείχνει την αύξηση του θαλάσσιου εμπορίου. Κάθε πλοίο συμβολίζει τον όγκο των εκπομπών για τα συγκεκριμένα έτη, με την αύξηση των εκπομπών να παρακολουθεί την αύξηση του θαλάσσιου εμπορίου, αλλά με κάποια διακύμανση.



Εικόνα 12 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας της ναυτιλίας [35]

Η Εικόνα 12 παρουσιάζει τις προβλεπόμενες εκπομπές CO_2 από διάφορους τύπους καυσίμων για τα έτη 2019 έως 2070 στο πλαίσιο του Σεναρίου Βιώσιμης Ανάπτυξης (Sustainable Development Scenario, SDS). Οι τύποι καυσίμων που περιλαμβάνονται είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο, η αμμωνία και η ηλεκτρική ενέργεια. Η γραφική παράσταση δείχνει πως οι εκπομπές CO_2 αναμένεται να μειωθούν με την αυξημένη χρήση καθαρότερων καυσίμων και τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα (CCS), ενώ τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο θα μειώνονται σταδιακά. Το υδρογόνο και η αμμωνία θα παίξουν κρίσιμο ρόλο στην απανθρακοποίηση των βιομηχανιών και των μεταφορών, ενώ η ηλεκτρική ενέργεια, κυρίως από ανανεώσιμες πηγές, θα αυξάνεται σημαντικά. Το SDS προβλέπει ότι οι εκπομπές CO_2 θα μειωθούν σε καθαρό μηδέν έως το 2070, επιτυγχάνοντας μια αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους 1.8°C με πιθανότητα 66%. Αυτές οι αλλαγές απαιτούν σημαντικές καινοτομίες και βελτιώσεις στις υπάρχουσες τεχνολογίες, όπως η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, η αποδοτική χρήση ενέργειας και η βελτίωση της απόδοσης των μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές

5 Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός

5.1 Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization, IMO) λειτουργεί ως ο κύριος ρυθμιστικός φορέας για τις διεθνείς ναυτιλιακές υποθέσεις, με την ίδρυσή του να βασίζεται σε συμφωνία του 1948 κατά τη Διάσκεψη της Γενεύης. Ξεκινώντας επίσημα τις δραστηριότητές του το 1959, ο IMO εστιάζει σε πολλές βασικές αρμοδιότητες για την ενίσχυση της παγκόσμιας θαλάσσιας ασφάλειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η έδρα του βρίσκεται στο Λονδίνο, κέντρο παγκόσμιας σημασία για τη ναυτιλία, ενισχύοντας το χαρακτήρα και τον διεθνές του κύρος [36].

Η αποστολή του IMO είναι να προωθεί την ασφαλή, περιβαλλοντικά ορθή, αποτελεσματική και βιώσιμη ναυτιλία μέσω διεθνούς συνεργασίας. Αυτή η αποστολή επιτυγχάνεται με τη θέσπιση των υψηλότερων πρακτικών προτύπων για την ασφάλεια στη θάλασσα, την αποτελεσματικότητα της ναυσιπλοΐας και την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης από τα πλοία. Περιλαμβάνει επίσης την εξέταση συναφών νομικών θεμάτων και την αποτελεσματική εφαρμογή των μέσων του IMO με σκοπό την καθολική και ομοιόμορφη εφαρμογή τους.

Για να υποστηρίξει αυτούς τους στόχους, ο IMO αναπτύσσει και διατηρεί ένα ολοκληρωμένο ρυθμιστικό πλαίσιο για τη ναυτιλία, το οποίο περιλαμβάνει συμβάσεις που στοχεύουν στην ασφάλεια της ζωής στη θάλασσα (SOLAS), την πρόληψη της ρύπανσης (MARPOL) και την εκπαίδευση και πιστοποίηση των ναυτικών (STCW). Αυτές οι συμβάσεις είναι κρίσιμες για τον καθορισμό διεθνών προτύπων που διασφαλίζουν την ασφάλεια των θαλάσσιων επιχειρήσεων και την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος [36].

Οι κυριότερες σημαντικές συμβάσεις και συμφωνίες είναι [37] :

- **Σύμβαση MARPOL**: Η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) είναι ένα από τα σημαντικότερα νομικά κείμενα που εκπονήθηκαν στο πλαίσιο του IMO. Αντιμετωπίζει τη ρύπανση από πλοία που προκαλείται από λειτουργικούς ή τυχαίους λόγους. Η MARPOL υπήρξε καθοριστική για τη σημαντική μείωση της ρύπανσης από πετρέλαιο, χημικές ουσίες και άλλες ουσίες που απορρίπτονται στη θάλασσα.

- **Σύμβαση SOLAS**: Η Διεθνής Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα (International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS) διασφαλίζει ότι τα πλοία με σημαία από τα υπογράφοντα κράτη συμμορφώνονται με τα ελάχιστα πρότυπα ασφάλειας στην κατασκευή, τον εξοπλισμό και τη λειτουργία. Θεωρείται ως η πιο σημαντική συνθήκη για την προστασία της ασφάλειας των εμπορικών πλοίων.

- **Σύμβαση STCW**: Η Διεθνής Σύμβαση για τα Πρότυπα Εκπαίδευσης, Πιστοποίησης και Επιτήρησης για Ναυτικούς (International Convention on Standards of Training, Certification, and Watchkeeping for Seafarers, STCW) ορίζει πρότυπα προσόντων για πλοιάρχους, αξιωματικούς και προσωπικό φρουρών σε ποντοπόρα εμπορικά πλοία.

- **Σύμβαση FAL**: Η Σύμβαση για τη διευκόλυνση της διεθνούς θαλάσσιας κυκλοφορίας (Convention on Facilitation of International Maritime Traffic, FAL) στοχεύει στην απλοποίηση και ελαχιστοποίηση των διατυπώσεων, των απαιτήσεων δεδομένων και των διαδικασιών που σχετίζονται με την άφιξη, τη διαμονή και την αναχώρηση των πλοίων από τους λιμένες. Η Σύμβαση FAL προωθεί τη χρήση ενός συστήματος «ενός παραθύρου» στους λιμένες, το οποίο επιτρέπει όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται από τις δημόσιες αρχές σχετικά με το πλοίο, το πλήρωμά του και το φορτίο του να υποβάλλονται μέσω ενός μόνο σημείου εισόδου.

Η οργανωτική δομή του IMO περιλαμβάνει τη Συνέλευση (Assembly), που είναι το ανώτατο διοικητικό όργανο, το Συμβούλιο (Council), το οποίο ενεργεί ως εκτελεστικό όργανο, και πολλές βασικές επιτροπές, όπως η Επιτροπή Ναυτικής Ασφάλειας (Maritime Safety Committee), η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee) και η Νομική Επιτροπή (Legal Committee). Τα όργανα αυτά υποστηρίζονται από μια Γραμματεία, με επικεφαλής τον Γενικό Γραμματέα, ο οποίος επιβλέπει τις καθημερινές δραστηριότητες του οργανισμού. Επί του παρόντος, ο IMO αποτελείται από 174 κράτη μέλη και τρία συνδεδεμένα μέλη, γεγονός που αντικατοπτρίζει την εκτεταμένη παγκόσμια επιρροή του.

Αυτή η δομή και τα ισχυρά νομικά της πλαίσια όχι μόνο υποστηρίζουν την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα της διεθνούς θαλάσσιας κυκλοφορίας, αλλά διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στην προστασία του παγκόσμιου θαλάσσιου περιβάλλοντος από τους πιθανούς κινδύνους της σύγχρονης ναυτιλίας.

5.1.1 MARPOL

Η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα Πλοία (MARPOL) αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο στις διεθνείς προσπάθειες για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ναυτιλίας. Ως ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), η MARPOL στοχεύει στην εξάλειψη και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης από τα πλοία, αντιμετωπίζοντας τόσο τη λειτουργική όσο και την τυχαία ρύπανση μέσω των διαφόρων παραρτημάτων της, καθένα προσαρμοσμένο σε συγκεκριμένους τύπους θαλάσσιας ρύπανσης.

Τα παραρτήματα της MARPOL συνοπτικά είναι [38]:

- **Παράρτημα I (Ρύπανση από πετρέλαιο)**: Αυτό το παράρτημα είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο, περιγράφοντας λεπτομερώς τις απαιτήσεις για την κατασκευή και τη λειτουργία πλοίων για την

ελαχιστοποίηση της απόρριψης πετρελαίου. Τεχνολογίες και επιχειρησιακά πρότυπα όπως το Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου Εκφόρτωσης Πετρελαίου (Oil Discharge Monitoring and Control System) και η απαίτηση για τα πετρελαιοφόρα να έχουν διπλό κύτος είναι μεταξύ των σημαντικών όρων του.

- **Παράρτημα II (Βλαβερές Υγρές Ουσίες)**: Καθορίζει τους διεθνείς κανονισμούς για τον έλεγχο και τη διαχείριση της απόρριψης επιβλαβών υγρών ουσιών από τα πλοία και περιλαμβάνει αυστηρές οδηγίες σχετικά με το χειρισμό και την τεκμηρίωση αυτών των ουσιών για την πρόληψη περιστατικών ρύπανσης.

- **Παράρτημα III (Επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται στη θάλασσα σε συσκευασμένη μορφή)**: Αυτό το παράρτημα επιβάλλει τις απαιτήσεις σήμανσης, επισήμανσης και συσκευασίας, διασφαλίζοντας ότι οι επιβλαβείς ουσίες μεταφέρονται με ασφάλεια και διαχειρίζονται για την αποφυγή ατυχημάτων.

- **Παράρτημα IV (Ρύπανση λυμάτων)**: Οι κανονισμοί βάσει αυτού του παραρτήματος διασφαλίζουν ότι τα πλοία είναι εξοπλισμένα με κατάλληλες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ή συστήματα για τη συγκράτηση των λυμάτων όταν τα πλοία βρίσκονται κοντά στην ακτή ή σε ευαίσθητα θαλάσσια περιβάλλοντα.

- **Παράρτημα V (Ρύπανση απορριμμάτων)**: Επικεντρώνεται στους διαφορετικούς τύπους απορριμμάτων από πλοία και προσδιορίζει τις αποστάσεις από την ξηρά και τους τρόπους με τους οποίους διαφορετικά υλικά μπορούν να απορριφθούν στη θάλασσα, μειώνοντας σημαντικά τη διάθεση πλαστικών και άλλων τύπων απορριμμάτων .

- **Παράρτημα VI (Ατμοσφαιρική ρύπανση)**: Αντιμετωπίζει την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία περιορίζοντας τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SOx), οξειδίων του αζώτου (NOx) και σωματιδίων. Ως απάντηση στις αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με τον παγκόσμιο αντίκτυπο των εκπομπών από τα πλοία στο κλίμα και την υγεία, αυτό το παράρτημα έχει υποβληθεί σε πρόσφατες τροποποιήσεις που εισάγουν τον Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) και τους Δείκτες Έντασης Άνθρακα για νέα και υπάρχοντα πλοία, αντίστοιχα.

Παρά το ολοκληρωμένο πεδίο εφαρμογής της, η εφαρμογή της MARPOL αντιμετώπισε προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά την επιβολή και τη συμμόρφωσή της σε διάφορες περιοχές. Μελέτες έχουν επισημάνει τις διαφορές στη συμμόρφωση μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών, που συχνά αποδίδονται σε διακυμάνσεις στις τεχνολογικές, οικονομικές και διοικητικές ικανότητες [39]. Αυτές οι προκλήσεις επιδεινώνονται από την ανάγκη για συνεχείς ενημερώσεις ώστε να συμβαδίζουν με τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις αναδυόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες.

Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα της MARPOL συνδέεται στενά με τους μηχανισμούς επιβολής του Λιμενικού Ελέγχου (PSC), οι οποίοι διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της συμμόρφωσης μέσω επιθεωρήσεων και κρατήσεων σκαφών που

διαπιστώνονται παραβίαση των απαιτήσεων της σύμβασης [40]. Η ποικιλομορφία στον τρόπο με τον οποίο διενεργούνται αυτές οι επιθεωρήσεις και τα κριτήρια για τις αποφάσεις κράτησης μπορούν να επηρεάσουν την ομοιόμορφη εφαρμογή των προτύπων που θέτει η MARPOL.

Η συνεχής εξέλιξη της MARPOL αντικατοπτρίζει μια δυναμική απάντηση στα πιεστικά ζητήματα της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι καινοτομίες στην ψηφιακή τεχνολογία και στην ανάλυση δεδομένων θεωρούνται όλο και περισσότερο ως καθοριστικές για την ενίσχυση των ικανοτήτων παρακολούθησης και επιβολής των ναυτιλιακών αρχών. Τα βελτιωμένα συστήματα δεδομένων διευκολύνουν πιο στοχευμένες και ενημερωμένες διαδικασίες λήψης αποφάσεων, οδηγώντας δυνητικά σε πιο αποτελεσματική κανονιστική συμμόρφωση και στρατηγικές πρόληψης της ρύπανσης [41].

5.2 Στόχοι του IMO για την μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει θέσει μια ολοκληρωμένη στρατηγική για τη δραστική μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) από τον ναυτιλιακό τομέα, ευθυγραμμιζόμενος με τις παγκόσμιες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και την τήρηση των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού. Αυτή η πολύπλευρη προσέγγιση περιλαμβάνει αυστηρούς ενδιάμεσους και μακροπρόθεσμους στόχους, την τεχνολογική καινοτομία και τη διεθνή συνεργασία.

Οι διευρυμένοι στόχοι και τα μέτρα της στρατηγικής του IMO για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου είναι :

- Ειδικοί στόχοι μείωσης των εκπομπών [42]:
    - **Βραχυπρόθεσμα**: Έως το 2030, ο IMO στοχεύει να μειώσει την «ένταση άνθρακα» της διεθνούς ναυτιλίας κατά τουλάχιστον 40% από τα επίπεδα του 2008, χρησιμοποιώντας επιχειρησιακά μέτρα και εισάγοντας ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες.
    - **Μεσοπρόθεσμα**: Ένας περαιτέρω στόχος μείωσης 70% έως το 2050 θέτει μια προοδευτική τροχιά προς την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές.
    - **Μακροπρόθεσμος**: Ο απώτερος στόχος είναι η σταδιακή εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το δεύτερο μισό του αιώνα, στοχεύοντας σε καθαρές μηδενικές εκπομπές το συντομότερο δυνατό εντός αυτού του χρονικού πλαισίου
- Τεχνολογικές εξελίξεις και μετάβαση καυσίμου:
    - Η υιοθέτηση τεχνολογιών επόμενης γενιάς και εναλλακτικών καυσίμων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη αυτών των στόχων. Αυτό περιλαμβάνει

την έρευνα και εφαρμογή βιοκαυσίμων, αμμωνίας, υδρογόνου και άλλων λύσεων δυνητικά μηδενικών εκπομπών, οι οποίες αναμένεται να αντικαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα πλοίων [43].

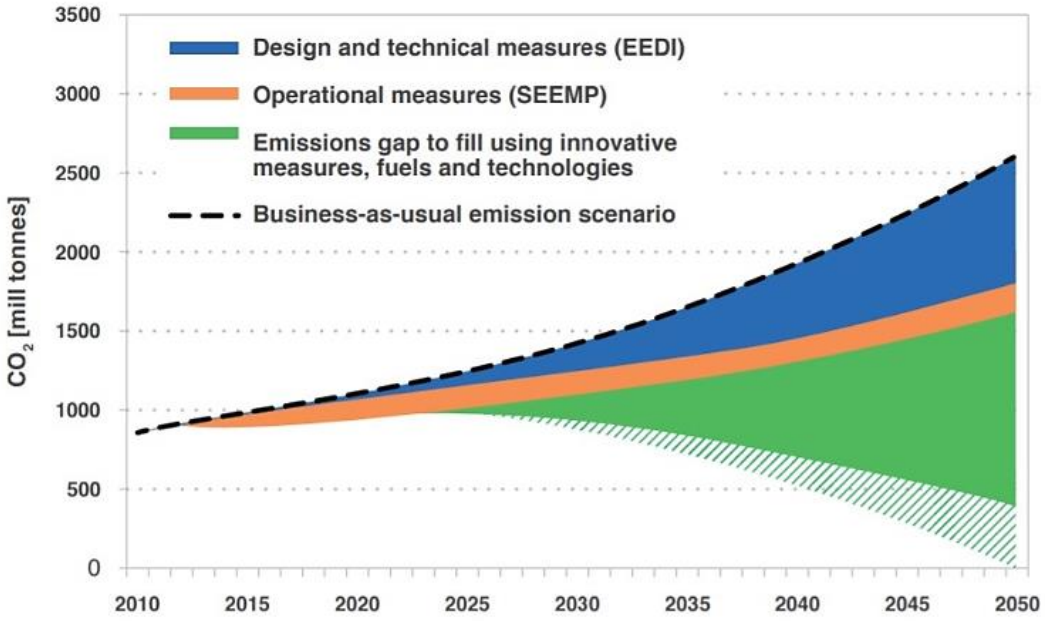
- Οι βελτιώσεις στον σχεδιασμό των πλοίων, όπως τα βελτιωμένα σχήματα του κύτους και τα προηγμένα συστήματα πρόωσης, παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και κατά συνέπεια στη μείωση των εκπομπών.

- Ρυθμιστικά πλαίσια και συμμόρφωση [44]:
  - Ο ΙΜΟ έχει εφαρμόσει αυστηρούς κανονισμούς όπως ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Πλοίων (Efficiency Existing Ship Index ,EEXI) και ο Δείκτης Έντασης Άνθρακα (Carbon Intensity Indicato, CII), οι οποίοι επιβάλλουν συγκεκριμένες λειτουργικές αποδόσεις για τα υπάρχοντα και νέα πλοία, αντίστοιχα.
  - Αυτοί οι κανονισμοί υποστηρίζονται από ένα ισχυρό πλαίσιο συμμόρφωσης και επιβολής που διασφαλίζει τη συμμόρφωση με τα πρότυπα μείωσης των εκπομπών σε όλο τον παγκόσμιο στόλο.

- Στρατηγικές και έρευνα που βασίζονται σε δεδομένα:
  - Οι μηχανισμοί συνεχούς παρακολούθησης και αναφοράς αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της στρατηγικής. Αυτά περιλαμβάνουν λεπτομερείς απογραφές GHG και αξιολογήσεις των θαλάσσιων εκπομπών, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα που ενημερώνουν τις προσαρμογές πολιτικής και τις τεχνολογικές εξελίξεις.
  - Οι ερευνητικές πρωτοβουλίες ενθαρρύνονται να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα και στην αξιολόγηση των περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεών τους.

- Διεθνής Συνεργασία και Ανάπτυξη Ικανοτήτων [45]:
  - Αναγνωρίζοντας τον παγκόσμιο χαρακτήρα των θαλάσσιων δραστηριοτήτων, ο ΙΜΟ προωθεί τη διεθνή συνεργασία για να διευκολύνει την ευρεία υιοθέτηση μέτρων μείωσης των εκπομπών. Αυτό περιλαμβάνει συνεργασίες με άλλους διεθνείς φορείς, κυβερνήσεις, ενδιαφερόμενους φορείς του κλάδου και την ερευνητική κοινότητα.
  - Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις προσπάθειες οικοδόμησης ικανοτήτων, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι όλες οι χώρες μπορούν να συμβάλουν και να επωφεληθούν από τις παγκόσμιες προσπάθειες μείωσης των εκπομπών.

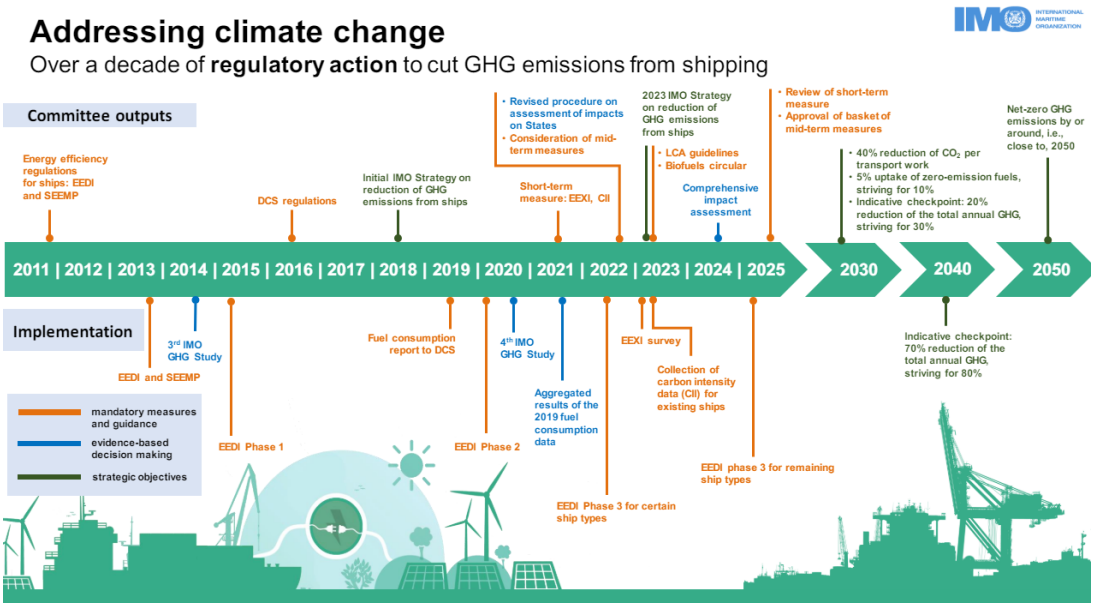
Η στρατηγική του IMO δεν αφορά μόνο τον καθορισμό φιλόδοξων στόχων αλλά και τη δημιουργία ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος που προωθεί την καινοτομία, τη συμμόρφωση και την αποτελεσματική δράση κατά των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τη θάλασσα. Καθώς αυτά τα μέτρα εφαρμόζονται, αναμένεται να οδηγήσουν σε σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, υποστηρίζοντας παράλληλα τη βιώσιμη ανάπτυξη της ναυτιλιακής βιομηχανίας.



Εικόνα 13: Πρόβλεψη εκπομπών CO2 από τη ναυτιλία έως το 2050, παρουσιάζοντας την επίδραση τεχνικών και λειτουργικών μέτρων, καθώς και καινοτόμων τεχνολογιών για τη μείωση εκπομπών σε σχέση με το σενάριο "Business-as-usual [46]

5.3 Τρόποι επίτευξης των στόχων του IMO

Για την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), έχουν εντοπιστεί αρκετές βασικές στρατηγικές και επί του παρόντος εφαρμόζονται ή διερευνώνται στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αυτές οι στρατηγικές επικεντρώνονται σε καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις, λειτουργικές προσαρμογές και ρυθμιστικά μέτρα που στοχεύουν στη σημαντική μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της διεθνούς ναυτιλίας



Εικόνα 14: Ρυθμιστικές δράσεις για τη μείωση των εκπομπών GHG από τη ναυτιλία [47]

5.3.1 Εναλλακτικά καύσιμα

Η υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων είναι μια κρίσιμη στρατηγική για την επίτευξη των στόχων μείωσης των αερίων θερμοκηπίου (GHG) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Αυτή η μετάβαση από τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα σε εναλλακτικές λύσεις χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα είναι απαραίτητη για την ανταπόκριση του ναυτιλιακού τομέα στις απαιτήσεις της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Τα τρία κύρια εναλλακτικά καύσιμα είναι:

- Βιοκαύσιμα: Προερχόμενα από βιολογικά υλικά όπως φυτά και φύκια, τα βιοκαύσιμα μπορούν να ενσωματωθούν σε υπάρχουσες υποδομές καυσίμων και κινητήρες, καθιστώντας τα μια ευέλικτη επιλογή για άμεσες μειώσεις εκπομπών GHG. Τα βιοκαύσιμα διατίθενται σε διάφορες μορφές, συμπεριλαμβανομένου του βιοντίζελ και της βιοαιθανόλης, τα οποία μπορούν να αντικαταστήσουν ή να αναμειχθούν με παραδοσιακά καύσιμα πλοίων για να μειώσουν την «ένταση άνθρακα» των θαλάσσιων δραστηριοτήτων. Η βιωσιμότητα των βιοκαυσίμων, ωστόσο, εξαρτάται από υπεύθυνες πρακτικές προμήθειας που δεν ανταγωνίζονται την παραγωγή τροφίμων ούτε προκαλούν αποψίλωση των δασών. Η δυνατότητα για σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου καθιστά τα βιοκαύσιμα μια ελκυστική, αν και μεταβατική, λύση ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες στη ναυτιλία [43] [48].

- Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG): Το LNG είναι ολοένα και πιο δημοφιλές στη ναυτιλιακή βιομηχανία λόγω της ικανότητάς του να μειώνει τις εκπομπές οξειδίων του θείου και σωματιδίων, εκπληρώνοντας τους αυστηρότερους κανονισμούς

εκπομπών στο πλαίσιο του ανώτατου ορίου θείου του IMO 2020. Σε σύγκριση με το βαρύ μαζούτ, το LNG μπορεί να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 20-25%. Ωστόσο, τα οφέλη του LNG περιπλέκονται από την απελευθέρωση μεθανίου, ενός ισχυρού αερίου θερμοκηπίου, κατά τη διάρκεια των διαδικασιών εξόρυξης και μεταφοράς, γνωστή ως διαφυγή μεθανίου (methane slip). Παρά αυτές τις ανησυχίες, το LNG χρησιμεύει ως σκαλοπάτι προς καθαρότερα καύσιμα, παρέχοντας τις απαραίτητες εξελίξεις υποδομής για μελλοντικά αέρια καύσιμα όπως το υδρογόνο [44].

- Αμμωνία και Υδρογόνο: Η αμμωνία και το υδρογόνο θεωρούνται μακροπρόθεσμες λύσεις για την επίτευξη βαθιάς απανθρακοποίησης της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Και τα δύο καύσιμα παράγουν μηδενικές εκπομπές CO_2 στο σημείο χρήσης. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από διάφορες διαδικασίες, κυρίως μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστώντας το ένα πραγματικά καύσιμο μηδενικών εκπομπών όταν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αμμωνία, που παράγεται από υδρογόνο και άζωτο, υπόσχεται επίσης λόγω της υψηλής ενεργειακής της πυκνότητας και της δυνατότητας χρήσης της υπάρχουσας παγκόσμιας υποδομής για την αποθήκευση και τη διανομή της. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όπως η τοξικότητα της αμμωνίας και η ανάγκη για σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στην αποθήκευση υδρογόνου και την ανάπτυξη κυψελών καυσίμου. Αυτά τα εμπόδια πρέπει να αντιμετωπιστούν για να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό αυτών των καυσίμων για την πλήρη απαλλαγή από εκπομπές άνθρακα στις θαλάσσιες μεταφορές [48].

Καθένα από αυτά τα εναλλακτικά καύσιμα προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και προκλήσεις, απαιτώντας προσεκτική ισορροπία τεχνολογικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Η μετάβαση σε αυτά τα καύσιμα θα χρειαστεί ισχυρά ρυθμιστικά πλαίσια, σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και συνεχή τεχνολογική καινοτομία. Η ανάπτυξη διεθνών κανονισμών και προτύπων από τον IMO θα είναι ζωτικής σημασίας για τη διευκόλυνση αυτής της μετάβασης, τη διασφάλιση της ασφάλειας και τη μεγιστοποίηση των περιβαλλοντικών οφελών.

5.3.2 Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης πλοίων

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων είναι μια βασική στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τους στόχους του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Αυτή η στρατηγική περιλαμβάνει τόσο βελτιστοποιήσεις σχεδιασμού όσο και την υιοθέτηση αυστηρών προτύπων όπως ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Efficiency Design Index, EEDI).

Οι εξελίξεις στον σχεδιασμό των πλοίων διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Οι καινοτομίες περιλαμβάνουν:

- Βελτιώσεις σχεδίασης κύτους: Η μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης μέσω καλύτερων μορφών κύτους μπορεί να μειώσει σημαντικά την ενέργεια που απαιτείται για την πρόωση.

- Προηγμένα συστήματα πρόωσης: Η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών πρόωσης, όπως συστήματα λίπανσης αέρα, που μειώνουν την αντίσταση στο νερό και προηγμένος σχεδιασμός προπέλας, μπορούν να οδηγήσουν σε ουσιαστικές βελτιώσεις στην απόδοση καυσίμου.

Το EEDI είναι ένας ρυθμιστικός μηχανισμός που εισήχθη από τον IMO και ορίζει ελάχιστα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης για νέα πλοία, με βάση τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου. Αυτός ο δείκτης υπολογίζεται αξιολογώντας την ποσότητα CO_2 που εκπέμπεται ανά τόνο μίλι μεταφερόμενου φορτίου και στοχεύει στην ενθάρρυνση της χρήσης πιο ενεργειακά αποδοτικών σχεδίων και τεχνολογιών πλοίων. Με την πάροδο του χρόνου, οι απαιτήσεις EEDI γίνονται όλο και πιο αυστηρές, αναγκάζοντας τους ναυπηγούς να ενσωματώσουν τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας σε νέα σχέδια πλοίων. Η σταδιακή εφαρμογή του EEDI διασφαλίζει ότι τα νέα πλοία θα είναι τουλάχιστον 10% πιο αποτελεσματικά έως το 2015, αυξάνοντας σε 20% έως το 2020 και 30% πιο αποτελεσματικά έως το 2025 σε σύγκριση με τη γραμμή βάσης.

$$EEDI = \frac{CO_2 Emission}{TransportWork}$$

Εκτός από τις βελτιώσεις σχεδιασμού, αρκετές επιχειρησιακές στρατηγικές βοηθούν στην επίτευξη συμμόρφωσης με το EEDI:

- Περιορισμός ισχύος κινητήρα (EPL): Αυτό περιλαμβάνει τον καθορισμό ορίων στη μέγιστη ισχύ που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι κινητήρες των πλοίων, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων. Το EPL είναι ένα οικονομικό μέτρο που δεν απαιτεί απαραιτήτως εκτεταμένες τροποποιήσεις στο πλοίο.

- Μετασκευή τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας: Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών όπως τα συστήματα ανάκτησης απορριμμάτων θερμότητας και πιο αποτελεσματικά συστήματα φωτισμού και θέρμανσης επί του σκάφους μπορεί να μειώσει περαιτέρω τη χρήση ενέργειας και τις εκπομπές.

Αυτά τα μέτρα υπογραμμίζουν τη συνολική προσέγγιση της ναυτιλιακής βιομηχανίας για τη μείωση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος μέσω τόσο της τεχνολογικής καινοτομίας όσο και μέσω ρυθμιστικών πλαισίων. Η συνεχής ανάπτυξη και επιβολή της EEDI διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην παγκόσμια στρατηγική για την απαλλαγή από τις

ανθρακούχες εκπομπές της ναυτιλίας και την ευθυγράμμιση με τους ευρύτερους στόχους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

5.3.3 Επιχειρησιακές στρατηγικές

Οι επιχειρησιακές στρατηγικές στη ναυτιλία, όπως η βελτιστοποίηση της ταχύτητας και οι αφίξεις Just-in-Time (JIT), είναι ζωτικής σημασίας στην επιστημονική έρευνα σχετικά με τη μείωση των αερίων θερμοκηπίου (GHG) στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αυτές οι προσεγγίσεις έχουν μελετηθεί εκτενώς για τις δυνατότητές τους να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς να μειώσουν τις εκπομπές.

- Βελτιστοποίηση Ταχύτητας [49]: Η πρακτική του "αργού ατμού" (slow steaming) αναφέρεται στη σκόπιμη μείωση των ταχυτήτων του πλοίου για μείωση της χρήσης καυσίμου και μείωση των εκπομπών. Αυτή η μέθοδος έχει αποτελέσει αντικείμενο πολυάριθμων μελετών, οι οποίες καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητά της στη μείωση του λειτουργικού κόστους και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Για παράδειγμα, η έρευνα έχει δείξει ότι η πρακτική του «αργού ατμού» μπορεί να οδηγήσει σε μέση εξοικονόμηση αερίων του θερμοκηπίου περίπου 19%, λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές προσαρμογές που απαιτούνται για τη διατήρηση του ίδιου επιπέδου μεταφορικών εργασιών. Ωστόσο, τα οικονομικά οφέλη μερικές φορές αντισταθμίζονται από μεγαλύτερους χρόνους παράδοσης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τη δυναμική της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι προσαρμογές στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως ο βελτιωμένος προγραμματισμός και η βελτιστοποίηση διαδρομής, είναι επομένως απαραίτητες για τον μετριασμό αυτών των επιπτώσεων και την πλήρη αξιοποίηση των οικονομικών πλεονεκτημάτων.

- Αφίξεις Just-In-Time (JIT) [50]: Οι στρατηγικές άφιξης JIT βελτιστοποιούν την ταχύτητα συγχρονισμού των πλοίων κατά την άφιξή τους με τη διαθεσιμότητα λιμενικών υπηρεσιών, μειώνοντας έτσι τους περιττούς χρόνους αναμονής και τη χρήση μηχανών (ρελαντί) στα λιμάνια. Μια μελέτη που ανατέθηκε από την Global Industry Alliance του IMO-Norway GreenVoyage2050 διαπίστωσε ότι οι αφίξεις JIT θα μπορούσαν να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου και τις συνακόλουθες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως και 14% ανά ταξίδι. Αυτή η βελτιστοποίηση όχι μόνο συμβάλλει στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου αλλά επίσης ενισχύει την αποδοτικότητα των λιμένων και μειώνει τις επιχειρησιακές καθυστερήσεις

Τόσο οι πρακτικές «αργού ατμού» όσο και οι αφίξεις JIT ενσωματώνονται σε ευρύτερες θαλάσσιες πολιτικές με στόχο τη βιωσιμότητα. Αυτές οι στρατηγικές ευθυγραμμίζονται με τα ρυθμιστικά πλαίσια του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) που ενθαρρύνουν την υιοθέτηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης σε ολόκληρη τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Ως εκ τούτου, αυτές οι λειτουργικές βελτιώσεις αποτελούν κρίσιμα στοιχεία του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίων (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP), το οποίο διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην εφαρμογή των πρόσφατων μέτρων ενεργειακής απόδοσης του IMO. Η συνεχιζόμενη ανάλυση και προσαρμογή αυτών των

στρατηγικών υποστηρίζεται από την παγκόσμια επιστημονική έρευνα. η οποία συνεχίζει να διερευνά καινοτόμους τρόπους για την αποτελεσματική εφαρμογή αυτών των μέτρων σε διαφορετικά τμήματα της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

5.3.4 Φόρος άνθρακα και συστήματα εμπορίας εκπομπών

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) αναζητά ενεργά μέτρα που βασίζονται στην αγορά (Market-Based Measures, MBM) όπως εισφορές άνθρακα και συστήματα εμπορίας εκπομπών για να δώσει κίνητρα για μειώσεις εκπομπών στον ναυτιλιακό τομέα. Αυτοί οι οικονομικοί μηχανισμοί έχουν σχεδιαστεί για να ενθαρρύνουν τους ιδιοκτήτες πλοίων να επενδύσουν σε καθαρότερες τεχνολογίες και καύσιμα εσωτερικεύοντας το κόστος των εκπομπών άνθρακα.

- Φόρος Άνθρακα (Carbon Levy): Ένας παγκόσμιος φόρος άνθρακα στις εκπομπές από πλοία θεωρείται ως μια άμεση και αποτελεσματική προσέγγιση. Αυτό θα συνεπαγόταν υποχρεωτικές συνεισφορές με βάση τις εκπομπές CO_2 των πλοίων, με τα έσοδα να διατίθενται ενδεχομένως σε ένα ειδικό Ταμείο για το Κλίμα του IMO. Ένα τέτοιο ταμείο θα μπορούσε να συμβάλει στη γεφύρωση του χάσματος τιμών μεταξύ των μηδενικών εκπομπών άνθρακα και των συμβατικών καυσίμων και θα στηρίξει την απαραίτητη υποδομή στα λιμάνια σε όλο τον κόσμο για νέα καύσιμα όπως το υδρογόνο και η αμμωνία. Αυτή η εισφορά θεωρείται ως ένας τρόπος για να επιταχυνθεί η στροφή προς τη ναυτιλία μηδενικών εκπομπών [51].

- Σύστημα εμπορίας εκπομπών (Emissions Trading System, ETS): Η συμπερίληψη της ναυτιλίας σε συστήματα εμπορίας εκπομπών, όπως π.χ. το ETS της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι μια άλλη στρατηγική υπό εξέταση. Αυτή η προσέγγιση θα απαιτούσε από τις ναυτιλιακές εταιρείες να αγοράζουν δικαιώματα για τις εκπομπές τους, ενσωματώνοντας έτσι τον ναυτιλιακό τομέα σε μια ευρύτερη αγορά πιστώσεων άνθρακα. Αυτό το σύστημα στοχεύει στη μείωση των εκπομπών θέτοντας ανώτατο όριο στις συνολικές επιτρεπόμενες εκπομπές και επιτρέποντας την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, δημιουργώντας έτσι ένα οικονομικό κίνητρο για μειώσεις. δίκαιες και αποτελεσματικές χωρίς δυσανάλογες επιπτώσεις σε ορισμένες περιοχές ή μικρότερους παράγοντες της αγοράς [52]. Ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη λειτουργική και οικονομική πραγματικότητα του ναυτιλιακού κλάδου, διασφαλίζοντας ότι τα μέτρα δεν τιμωρούν άδικα ορισμένα τμήματα της αγοράς ούτε οδηγούν σε οικονομικές στρεβλώσεις. Επιπλέον, η παγκόσμια συνεργασία και ευθυγράμμιση είναι ζωτικής σημασίας, καθώς μονομερή μέτρα όπως το περιφερειακό ETS μπορεί να οδηγήσουν σε κατακερματισμό της αγοράς και θα μπορούσαν να περιπλέξουν τις διεθνείς ναυτιλιακές δραστηριότητες. Αυτά τα MBM, εάν σχεδιαστούν και εφαρμοστούν αποτελεσματικά, θα μπορούσαν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στην καθοδήγηση της παγκόσμιας ναυτιλιακής βιομηχανίας προς μια κατεύθυνση

ευθυγραμμισμένη με τους διεθνείς στόχους για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής [53]

5.3.5 Τεχνολογίες μείωσης εκπομπών

Οι τεχνολογικές καινοτομίες στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση των εκπομπών και την ενίσχυση της βιωσιμότητας, με σημαντικές εξελίξεις στα συστήματα λίπανσης αέρα, τα πανιά ρότορα και την ενσωμάτωση ηλιακών πάνελ. Συστήματα λίπανσης αέρα

Η τεχνολογία λίπανσης αέρα εστιάζει στη μείωση της αντίστασης του κύτους μέσω της χρήση φυσαλίδων αέρα, οι οποίες μπορούν να μειώσουν σημαντικά την τριβή μεταξύ του κύτους του πλοίου και του νερού. Αυτή η τεχνολογία περιλαμβάνει διάφορες προσεγγίσεις [54]:

- Μείωση τριβής με μικροφυσαλίδες (Microbubble Drag Reduction): Αυτή η μέθοδος εγχέει μικροσκοπικές φυσαλίδες κατά μήκος της επιφάνειας της γάστρας, μειώνοντας αποτελεσματικά την τριβή με το νερό.
- Συστήματα φιλμ αέρα και κοιλότητας αέρα (Air Film and Air Cavity Systems): Αυτά τα συστήματα είτε διατηρούν ένα συνεχές φιλμ αέρα είτε δημιουργούν κοιλότητες αέρα κάτω από τη γάστρα για να παρέχουν μια σταθερή μείωση της οπισθέλκουσας σε ολόκληρη τη βυθισμένη επιφάνεια.

Η έρευνα έχει επισημάνει ότι αυτά τα συστήματα λίπανσης αέρα μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου έως και 8%, προσφέροντας όχι μόνο σημαντική εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους αλλά και συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών άνθρακα [55].

Τα πανιά ρότορα (Rotor Sails) χρησιμοποιούν το φαινόμενο Magnus για να δημιουργήσουν ώθηση προς τα εμπρός από πλευρικό άνεμο, μειώνοντας αποτελεσματικά την εξάρτηση από τα παραδοσιακά συστήματα πρόωσης και μειώνοντας τη χρήση καυσίμου. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα πανιά με ρότορα μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO_2 κατά 1% έως 47%, με τη συγκεκριμένη εξοικονόμηση να εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, τη διαδρομή και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (κατεύθυνση και ένταση ανέμου) [56]. Συμπληρώνοντας τα πανιά ρότορα, τα ηλιακά πάνελ (Solar Panels) παρέχουν μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί τα συστήματα επί του σκάφους, μειώνοντας περαιτέρω το φορτίο στους κύριους κινητήρες και συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών ενσωματώνοντας μια συνολική προσέγγιση για τη μείωση των εκπομπών. Αυτή η ενοποίηση επιτρέπει στα πλοία να αξιοποιούν διάφορα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική και ηλιακή), οδηγώντας σε υψηλότερες αποδόσεις και πιο ουσιαστικές μειώσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η συνεχιζόμενη πρόοδος αυτών των τεχνολογιών είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση και την ευρύτερη υιοθέτησή τους στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Εικόνα 15: Εφαρμογή Rotor sails σε εμπορικό πλοίο [57]

6 Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης Απορριπτόμενης Θερμότητας

6.1 Εισαγωγή

Η ναυτιλιακή βιομηχανία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στο παγκόσμιο εμπόριο, καθώς αντιπροσωπεύει πάνω από το 80% του παγκόσμιου όγκου εμπορευμάτων, σύμφωνα με τη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη (UNCTAD - United Nations Conference on Trade and Development). Το ποσοστό αυτό είναι ακόμη υψηλότερο για πολλές αναπτυσσόμενες χώρες [58] [59]. Η ναυτιλία είναι ο πυρήνας της παγκόσμιας οικονομίας, διευκολύνοντας το διαρκώς αυξανόμενο εμπόριο και μεταφέροντας το 90% των εμπορευμάτων διεθνώς.

Ωστόσο, αυτός ο βασικός τομέας συμβάλλει επίσης σημαντικά όπως έχει ήδη αναφερθεί στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς είναι υπεύθυνος για περίπου το 2-3% των παγκόσμιων εκπομπών CO_2, σύμφωνα με τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO). Με την αύξηση του κόστους των καυσίμων και τους αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων είναι απαραίτητη για την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων.

Ένα σημαντικό ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται από τα πλοία χάνεται ως απορριπτόμενη θερμότητα. Αυτή η απώλεια θερμότητας προέρχεται κυρίως από τους κινητήρες (κύριους και βοηθητικούς), αλλά και από άλλα ενσωματωμένα συστήματα, όπως οι λέβητες. Η ανάκτηση και η εκμετάλλευση αυτής της θερμότητας παρουσιάζουν ένα αναξιοποίητο δυναμικό για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Μια σημαντική καινοτομία είναι η εφαρμογή των συστημάτων ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας (WHR - Waste Heat Recovery), τα οποία μπορούν να δεσμεύουν και να μετατρέπουν την θερμότητα αυτή σε χρήσιμη ενέργεια. Επιστημονικές έρευνες έχουν αναγνωρίσει τις δυνατότητες των συστημάτων WHR για την επίτευξη αυτών των στόχων. Έχουν μελετηθεί διάφορες τεχνολογίες για τη δέσμευση και τη μετατροπή της απορριπτόμενης θερμότητας σε χρήσιμη ενέργεια, όπως ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC-Organic Rankine Cycle) και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEGs-Thermoelectric Generators), που μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες [60] [61].

Η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας δεν μειώνει μόνο την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO_2, αλλά προσφέρει επίσης έναν τρόπο συμμόρφωσης με τους διεθνείς κανονισμούς που στοχεύουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ναυτιλίας. Αυτό ευθυγραμμίζεται με τους στόχους της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του IMO (MEPC - Marine Environment Protection Committee) για μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 50% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008.

Η εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας ευθυγραμμίζεται με τις ευρύτερες βιομηχανικές τάσεις προς την αύξηση της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας. Ως εκ τούτου, η ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να επωφεληθεί σημαντικά από την ενσωμάτωση τεχνολογιών WHR, δημιουργώντας προηγούμενο και για άλλους τομείς που θα ακολουθήσουν.

6.2 Πηγές απορριπτόμενης θερμότητας

Η απορριπτόμενη θερμότητα στα πλοία προκύπτει από την αναποτελεσματικότητα των διαδικασιών μετατροπής ενέργειας των κινητήρων πλοίων και των βοηθητικών μηχανημάτων. Η αξιοποίηση αυτής της θερμότητας όχι μόνο βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση αλλά και μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ευθυγραμμίζοντας με τα παγκόσμια ρυθμιστικά πλαίσια. Παρακάτω αναφέρονται οι πρωτογενείς πηγές απορριπτόμενης θερμότητας στα πλοία, τα χαρακτηριστικά τους και οι δυνατότητές τους για ανάκτηση.

Καυσαέρια κύριας μηχανής

Οι κύριοι κινητήρες, συνήθως οι μεγάλοι δίχρονοι κινητήρες ντίζελ, είναι οι κύριες μονάδες πρόωσης στα πλοία. Αυτοί οι κινητήρες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια από το καύσιμο σε μηχανική ενέργεια, με ένα σημαντικό μέρος αυτής της ενέργειας να χάνεται ως θερμότητα στα καυσαέρια. Η θερμοκρασία αυτών των καυσαερίων κυμαίνεται από 300°C έως 450°C. Μελέτες δείχνουν ότι περίπου το 25-30% της ενέργειας που εισάγεται στους κινητήρες ντίζελ πλοίων χάνεται ως θερμότητα καυσαερίων. Για παράδειγμα, ένα μεγάλο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με κύρια ισχύ κινητήρα 50.000 kW μπορεί να παράγει περίπου 12.500 έως 15.000 kW απορριπτόμενης θερμότητας μέσω των καυσαερίων του. Οι ατμοποιητές καυσαερίων (Exhaust gas economizers -EGEs) χρησιμοποιούνται για τη δέσμευση αυτής της θερμότητας, παράγοντας ατμό που μπορεί να κινήσει τουρμπίνες ή να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα θέρμανσης. Η πρόοδος στα υλικά υψηλής θερμοκρασίας και τα σχέδια εναλλάκτη θερμότητας έχουν βελτιώσει σημαντικά την απόδοση αυτών των συστημάτων, επιτρέποντας την καλύτερη χρήση της θερμότητας των καυσαερίων [62].

Βοηθητικές Μηχανές και Γεννήτριες

Οι βοηθητικοί κινητήρες στα πλοία είναι απαραίτητοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορα συστήματα επί του σκάφους, συμπεριλαμβανομένου του φωτισμού, της πλοήγησης και της διαχείρισης φορτίου. Αυτοί οι κινητήρες, που λειτουργούν με καύσιμα ντίζελ ή φυσικό αερίο, παράγουν καυσαέρια σε θερμοκρασίες παρόμοιες με εκείνες των κύριων κινητήρων, συνήθως μεταξύ 300°C και 450°C. Περίπου το 30% της ενέργειας καυσίμου στους βοηθητικούς κινητήρες χάνεται μέσω των καυσαερίων. Για ένα σκάφος μεσαίου μεγέθους με συνολική ισχύ εξόδου βοηθητικού κινητήρα 5.000 kW, περίπου 1.500 kW αντιστοιχούν σε απορριπτόμενη θερμότητας. Παρόμοια με τους

κύριους κινητήρες, αυτή η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί χρησιμοποιώντας εξοικονομητές καυσαερίων, ιδιαίτερα επωφελής όταν το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι ή κατά τη διάρκεια εργασιών χαμηλού φορτίου [63].

Συστήματα Ψύξης

Τα συστήματα ψύξης, συμπεριλαμβανομένης της ψύξης του κύριου κινητήρα, της βοηθητικής ψύξης του κινητήρα και των συστημάτων για λιπαντικό λάδι και κλιματισμό, παρουσιάζουν επίσης σημαντικά ποσά απώλειας θερμότητας. Αυτά τα συστήματα μεταφέρουν θερμότητα από τους κινητήρες και άλλα μηχανήματα στο νερό ψύξης, το οποίο συνήθως απορρίπτεται στη θάλασσα. Το νερό ψύξης συνήθως φτάνει σε θερμοκρασίες μεταξύ 70°C και 90°C. Αυτή η θερμότητα χαμηλότερης θερμοκρασίας εξακολουθεί να είναι σημαντική, καθώς αντιπροσωπεύει περίπου το 20-30% της συνολικής ενέργειας που εισάγεται στους κινητήρες. Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να ανακτήσουν την απορριπτόμενη θερμότητα από το νερό ψύξης για την προθέρμανση του καυσίμου ή την παραγωγή ζεστού νερού για χρήση στο σκάφος. Η πρόοδος σε συμπαγή και αποδοτικά σχέδια εναλλάκτη θερμότητας, όπως οι πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας, έχουν ενισχύσει τη σκοπιμότητα ανάκτησης θερμότητας από αυτές τις πηγές χαμηλότερης θερμοκρασίας [64].

Συστήματα ατμού και θερμού νερού

Τα συστήματα υδρατμών και θερμού νερού που χρησιμοποιούνται για καθημερινούς και επιχειρησιακούς σκοπούς στα πλοία παράγουν επίσης απώλεια θερμότητας. Αυτά τα συστήματα λειτουργούν σε διάφορες θερμοκρασίες ανάλογα με τις συγκεκριμένες λειτουργίες τους και η θερμότητα των καυσαερίων τους μπορεί να συλλεχθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, τα καυσαέρια από τους αποτεφρωτήρες του πλοίου, που χρησιμοποιούνται για τη διάθεση των απορριμμάτων, μπορούν να φτάσουν σε θερμοκρασίες παρόμοιες με εκείνες των καυσαερίων της κύριας μηχανής, προσφέροντας μια άλλη οδό για ανάκτηση θερμότητας.

Διάφορες πηγές θερμότητας

Οι πρόσθετες πηγές απορριπτόμενης θερμότητας περιλαμβάνουν αεροσυμπιεστές, μονάδες ψύξης και υδραυλικά συστήματα. Αν και μεμονωμένα συστήματα μικρότερης κλίμακας, συνολικά, αυτές οι πηγές συνεισφέρουν μια αξιοσημείωτη ποσότητα ανακτήσιμης θερμότητας. Η ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου ενός πλοίου δείχνει ότι η απορριπτόμενη θερμότητα αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής εισροής ενέργειας, με μελέτες που δείχνουν ότι έως και το 50% της ενέργειας από την καύση του καυσίμου χάνεται ως απορριπτόμενη θερμότητα μέσω διαφόρων οδών [65].

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι κύριες πηγές απορριπτόμενης θερμότητας σε πλοία ταξινομημένες ως προς τι κύριες μηχανές με ορισμένα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 2: Πηγές απορριπτόμενης θερμότητας στις κύριες μηχανές [66]

Engine Type	Medium	Share in Supplied Heat (%)	Temperature (°C)	Flow (kg/kWh)
Low-speed	Exhaust Gas	26.0 - 31.5	240 - 300	8.0 - 9.3
	Charge Air	11.2 - 14.5	160 - 190	7.8 - 9.1
	Cooling Water	6.3 - 7.9	80 - 115	-
Medium-speed	Exhaust Gas	24.8 - 33.9	380 - 450	6.5 - 7.7
	Charge Air	9.4 - 13.0	160 - 210	6.3 - 7.5
	Cooling Water	7.0 - 8.4	80 - 115	-

Τα δεδομένα του Πίνακα 2 παρουσιάζονται σε τρείς κύριες κατηγορίες: καυσαέρια, αέρας φόρτισης και νερό ψύξης [66].

- Κινητήρες χαμηλής ταχύτητας: Τα καυσαέρια αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της ανακτήσιμης θερμότητας, που κυμαίνεται μεταξύ 26.0% και 31.5% της συνολικής παραγόμενης θερμότητας, με θερμοκρασίες που εκτείνονται από 240°C έως 300°C και ρυθμό ροής 8.0 έως 9.3 kg/kWh. Η υψηλή θερμοκρασία και ο ουσιαστικός ρυθμός ροής καθιστούν αυτό το μέσο ένα κύριο υποψήφιο για αποτελεσματική ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας. Ο αέρας φόρτισης συνεισφέρει 11.2% έως 14.5% της συνολικής απορριπτόμενης θερμότητας με χαμηλότερες θερμοκρασίες από 160°C έως 190°C και παρόμοιους ρυθμούς ροής 7.8 έως 9.1 kg/kWh. Αυτό το μέσο απαιτεί συνήθως συστήματα που μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά σε μέτριες θερμοκρασίες. Η θερμότητα που συλλέγεται από το νερό ψύξης του κινητήρα αποτελεί το 6.3% έως 7.9% του συνόλου, σε σχετικά χαμηλότερες θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 80°C έως 115°C. Αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται συχνά λιγότερο για τη μετατροπή ενέργειας και περισσότερο για εφαρμογές όπως η παραγωγή γλυκού νερού.
- Κινητήρες μεσαίας ταχύτητας: Τα καυσαέρια έχουν ελαφρώς χαμηλότερο ποσοστό απορριπτόμενης θερμότητας από τους κινητήρες χαμηλής ταχύτητας, μεταξύ 24.8% και 33.9%, αλλά σε σημαντικά υψηλότερες θερμοκρασίες από 380°C έως 450°C, καθιστώντας τα εξαιρετικά κατάλληλα για συστήματα ανάκτησης θερμότητας υψηλής απόδοσης. Ο ρυθμός ροής εδώ κυμαίνεται από 6.5 έως 7.7 kg/kWh. Ο αέρας φόρτισης συνεισφέρει 9.4% έως 13.0% της απορριπτόμενης θερμότητας, αλλά σε ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες από 160°C έως 210°C σε σύγκριση με τους κινητήρες χαμηλής ταχύτητας και με ρυθμούς ροής μεταξύ 6.3 και 7.5 kg/kWh. Αντίστοιχα το νερό ψύξης συνεισφέρει 7.0% έως 8.4%, σε θερμοκρασίες κατάλληλες για χρήσεις, παρόμοιες με τους κινητήρες χαμηλής ταχύτητας.

6.2.1 Διαγράμματα Sankey σε μελέτες κατανάλωσης ενέργειας σε πλοία

Τα διαγράμματα Sankey είναι ισχυρά εργαλεία οπτικοποίησης που χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν τη ροή ενέργειας, υλικών ή κόστους μέσα σε ένα σύστημα. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η χρήση βελών ή γραμμών, των οποίων το πλάτος είναι ανάλογο

με την ποσότητα της ροής, καθιστώντας τα ιδανικά για την ανάδειξη αναποτελεσματικών και μεγάλων περιοχών κατανάλωσης. Εδώ αναφερόμαστε στη χρήση των διαγραμμάτων Sankey στο πλαίσιο της κατανάλωσης ενέργειας σε πλοία και εξετάζεται η αποτελεσματικότητά τους στην αναπαράσταση πολύπλοκων ενεργειακών συστημάτων.

Ένα τυπικό διάγραμμα Sankey αποτελείται από κόμβους που αντιπροσωπεύουν διάφορες διεργασίες ή στάδια μέσα σε ένα σύστημα, που συνδέονται με βέλη που υποδηλώνουν τη ροή των πόρων. Οι κόμβοι σε ένα διάγραμμα Sankey μπορούν να αντιπροσωπεύουν οποιαδήποτε διαδικασία, μηχανή ή τοποθεσία όπου καταναλώνεται ή μετασχηματίζεται ενέργεια. Οι ροές μεταξύ των κόμβων δείχνουν πώς η ενέργεια κινείται μέσα στο σύστημα. Το βασικό χαρακτηριστικό των διαγραμμάτων Sankey είναι ότι το πλάτος των βελών είναι ανάλογο με την ποσότητα ροής, επιτρέποντας την εύκολη οπτική σύγκριση διαφορετικών ροών ενέργειας.

Τα πλοία και ειδικότερα τα μεγάλα πλοία όπως τα κρουαζιερόπλοια ή τα φορτηγά, διαθέτουν πολύπλοκα ενεργειακά συστήματα με πολλαπλές πηγές ενέργειας αλλά και σημεία υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η ανάλυση αυτών των συστημάτων μπορεί να είναι δύσκολη λόγω των διαφόρων τρόπων λειτουργίας και των διαφορετικών μορφών ενέργειας που εμπλέκονται. Τα διαγράμματα Sankey προσφέρουν έναν σαφή τρόπο οπτικοποίησης αυτών των πολυπλοκοτήτων.

Για ένα μεγάλο πλοίο, η εισροή πρωτογενούς ενέργειας είναι το καύσιμο, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο από κύριους όσο και από βοηθητικούς κινητήρες. Η έξοδος περιλαμβάνει μηχανική ενέργεια για πρόωση, ηλεκτρική ενέργεια για διάφορα συστήματα επί του πλοίου και θερμική ενέργεια. Σημαντικά μέρη όμως της ενέργειας χάνονται ως θερμότητα, η οποία μπορεί να ανακτηθεί εν μέρει μέσω συστημάτων όπως οι γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας (HRSG). Αυτές οι ανακτηθείσες ενέργειες συχνά επαναχρησιμοποιούνται για θέρμανση και άλλους σκοπούς επί του σκάφους.

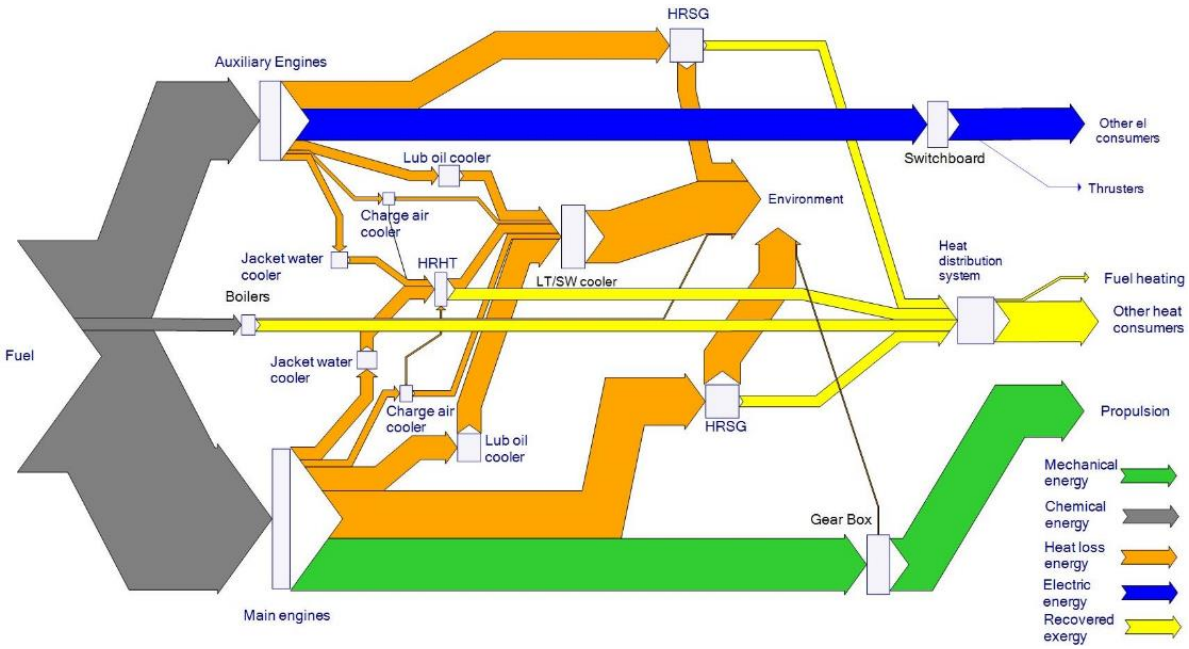
Μια λεπτομερής μελέτη των Baldi et al. (2015) [67] ενεργειακής ανάλυση ενός κρουαζιερόπλοιου που εκτελούσε δρομολόγια στη Βαλτική Θάλασσα ανέδειξε τα ακόλουθα στοιχεία:

- Κατανομή χρήσης ενέργειας: Η ανάλυση έδειξε ότι η πρόωση καταναλώνει το 41% της συνολικής ενέργειας, η παραγωγή θερμότητας αντιπροσωπεύει το 34% και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνει το 25%. Αυτή η κατανομή υπογραμμίζει τις σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις των βοηθητικών συστημάτων πέρα από την απλή πρόωση.

- Βοηθητική ισχύς: Η ζήτηση για βοηθητική ισχύ είναι σχεδόν εξίσου σημαντική με εκείνη για την πρόωση, υποδεικνύοντας τη σημασία της εξέτασης όλων των συστημάτων που καταναλώνουν ενέργεια επί του σκάφους.

- Απώλειες θερμότητας: Οι απώλειες θερμότητας, που απεικονίζονται ως πορτοκαλί βέλη στο διάγραμμα Sankey, αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας

που δεν χρησιμοποιείται για παραγωγική εργασία. Τα αποτελεσματικά συστήματα ανάκτησης θερμότητας μπορούν να μετριάσουν ορισμένες από αυτές τις απώλειες.



Εικόνα 16: Διάγραμμα Sankey ροής ενέργειας για κρουαζιερόπλοιο [67]

6.3 Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από καυσαέρια

Η ανάκτηση καυσαερίων είναι μια βασική τεχνολογία στη ναυτιλιακή βιομηχανία που στοχεύει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα καυσαέρια από τις κύριες και τις βοηθητικές μηχανές είναι οι πιο σημαντικές πηγές απόρριψης θερμότητας στα πλοία. Η υψηλή θερμοκρασία και το ενεργειακό περιεχόμενο των καυσαερίων τα καθιστούν ιδανικά για πολλές τεχνολογίες WHR. Οι κυριότερες εφαρμοζόμενες τεχνολογίες είναι:

- Ατμοποιητές καυσαερίων (Exhaust Gas Economizers -EGE)
- Συστήματα οργανικού κύκλου Rankine (ORC)
- Ατμογεννήτρια ανάκτησης θερμότητας (Heat Recovery Steam Generators -HRSG)

Παρακάτω αναλύονται οι εφαρμογές αυτές ως προς την εφαρμογή τους για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας από καυσαέρια

6.3.1 Εξοικονομητές Καυσαερίων (EGEs)

Οι εξοικονομητές καυσαερίων (EGEs) έχουν σχεδιαστεί για να ανακτούν την απορριπτόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια των κινητήρων ντίζελ πλοίων. Αυτοί οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούν τις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων, οι οποίες τυπικά κυμαίνονται από 300°C έως 450°C, για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς επί του σκάφους, όπως θέρμανση, ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση ατμοστροβίλων για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η διαδικασία όχι μόνο βελτιώνει τη συνολική ενεργειακή απόδοση του πλοίου, αλλά μειώνει επίσης την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές [68] [69].

Εικόνα 17: Εξοικονομητής Καυσαερίων [68]

Πλεονεκτήματα EGEs

- Απόδοση καυσίμου και εξοικονόμηση κόστους: Με την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, οι EGEs μειώνουν σημαντικά την ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή ατμού για τις λειτουργίες του πλοίου. Μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή EGEs μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση καυσίμου έως και 10%, πράγμα που μεταφράζεται σε σημαντικές μειώσεις του κόστους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής διάρκειας ζωής του πλοίου [61] .
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Οι EGEs συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη συμμόρφωση με τους διεθνείς ναυτιλιακούς κανονισμούς, όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) 2020 Sulphur Cap και ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) [34].

- Λειτουργική ευελιξία: Τα EGE μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα ευρύ φάσμα τύπων πλοίων, από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και δεξαμενόπλοια έως πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και επιβατηγά πλοία. Η ευελιξία και η προσαρμοστικότητά τους τα καθιστούν μια πολύτιμη τεχνολογία για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης διαφόρων κατηγοριών πλοίων.

Οικονομική Αξιολόγηση-Προκλήσεις

Η οικονομική βιωσιμότητα των EGEs εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων του κόστους εγκατάστασης, των απαιτήσεων συντήρησης και της πιθανής εξοικονόμησης καυσίμου. Το κόστος εγκατάστασης για τα EGE μπορεί να κυμαίνεται από 5000000 $ έως 9500000 $ ανά πλοίο, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμάται ότι είναι περίπου $20000 έως $30000 ανά πλοίο. Παρά το υψηλό αρχικό κόστος, η μακροπρόθεσμη εξοικονόμηση καυσίμων και οι μειώσεις των εκπομπών καθιστούν τα συστήματα EGEs μια αξιόλογη επένδυση. Η περίοδος απόσβεσης για αυτά τα συστήματα μπορεί να ποικίλλει, αλλά γενικά προσφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του σκάφους [34].

Η συσσώρευση αιθάλης στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας μπορεί να μειώσει σημαντικά την απόδοση των EGEs. Ο τακτικός καθαρισμός και η συντήρηση, συμπεριλαμβανομένης της εμφύσησης αιθάλης και του πλυσίματος με νερό, είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της βέλτιστης απόδοσης. Οι προηγμένες τεχνολογίες καθαρισμού αιθάλης και τα αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν να μειώσουν το κόστος συντήρησης και να εξασφαλίσουν συνεχή λειτουργία .

Τα συστήματα EGEs είναι ευαίσθητα σε πυρκαγιές αιθάλης, ιδιαίτερα εάν συσσωρεύεται αιθάλη στους σωλήνες. Τα προληπτικά μέτρα, όπως η διασφάλιση της πλήρους καύσης του καυσίμου και η διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας, είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια. Η εφαρμογή προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης μπορεί να ανιχνεύσει πρώιμα σημάδια συσσώρευσης αιθάλης και πιθανούς κινδύνους πυρκαγιάς, επιτρέποντας την έγκαιρη επέμβαση [61].

Η ενσωμάτωση EGEs στα υπάρχοντα συστήματα πλοίων μπορεί να είναι πολύπλοκη και μπορεί να απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις στη διάταξη του σκάφους. Οι περιορισμοί χώρου και βάρους πρέπει να λαμβάνονται προσεκτικά υπόψη κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και εγκατάστασης. Τα σύγχρονα EGEs έχουν σχεδιαστεί για να είναι συμπαγή και αρθρωτά, επιτρέποντας την ευκολότερη ενσωμάτωση σε διάφορες διαμορφώσεις πλοίων [68].

6.3.2 Συστήματα Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC)

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC) είναι μια καινοτόμος θερμοδυναμική διαδικασία που έχει σχεδιαστεί για να μετατρέπει χαμηλής ποιότητας απορριπτόμενη θερμότητα σε

χρήσιμη μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια. Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό κύκλο Rankine, ο οποίος χρησιμοποιεί το νερό ως εργαζόμενο ρευστό, τα συστήματα ORC χρησιμοποιούν οργανικά υγρά με χαμηλότερα σημεία βρασμού. Αυτό καθιστά τα συστήματα ORC ιδιαίτερα αποτελεσματικά για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας από πηγές όπως τα καυσαέρια κινητήρων πλοίων.

Πλεονεκτήματα των συστημάτων ORC

- Απόδοση καυσίμου και εξοικονόμηση κόστους: Τα συστήματα ORC ενισχύουν την απόδοση καυσίμου των πλοίων μετατρέποντας την απορριπτόμενη θερμότητα σε πρόσθετη ηλεκτρική ή μηχανική ισχύ. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα συστήματα ORC μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση καυσίμου 5-9% ετησίως, ανάλογα με το λειτουργικό προφίλ του πλοίου. Αυτό μεταφράζεται σε σημαντικές μειώσεις του κόστους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής διάρκειας ζωής του [70].

- Περιβαλλοντικός αντίκτυπος: Βελτιώνοντας την απόδοση καυσίμου και μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου, τα συστήματα ORC συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό είναι κρίσιμο για τη συμμόρφωση με τους διεθνείς ναυτιλιακούς κανονισμούς που ορίζονται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), ο οποίος στοχεύει στη μείωση των εκπομπών κατά τουλάχιστον 50% από τα επίπεδα του 2008 έως το 2050 [6].

- Λειτουργική ευελιξία: Τα συστήματα ORC μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορες πηγές θερμότητας και λειτουργικές συνθήκες, καθιστώντας τα ευέλικτα για διαφορετικούς τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, πλοίων υπεράκτιων υπηρεσιών και πορθμείων. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει τη βελτιστοποίηση με βάση συγκεκριμένες απαιτήσεις στο πλοίο και τις διαθέσιμες πηγές θερμότητας αποβλήτων [70].

Η επιλογή του ρευστού εργασίας είναι κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των συστημάτων ORC. Ρευστά όπως κυκλοπεντάνιο, n-επτάνιο, n-οκτάνιο, μεθανόλη και αιθανόλη χρησιμοποιούνται συνήθως λόγω των κατάλληλων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων τους και της συμβατότητάς τους με θαλάσσιες εφαρμογές. Η επιλογή του ρευστού επηρεάζει την απόδοση του συστήματος, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη λειτουργική ασφάλεια [71].

Η αποτελεσματική ενσωμάτωση συστημάτων ORC σε υπάρχοντα συστήματα ισχύος επί του πλοίου είναι απαραίτητη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αυτό περιλαμβάνει προσεκτική εξέταση των χαρακτηριστικών της πηγής θερμότητας, της διάταξης του συστήματος και των στρατηγικών ελέγχου. Τα προηγμένα συστήματα ελέγχου μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση του ORC προσαρμόζοντας τις λειτουργικές παραμέτρους σε απόκριση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της πηγής θερμότητας.

Οικονομική Αξιολόγηση-Προκλήσεις

Η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων ORC εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των τιμών των καυσίμων, του κόστους εγκατάστασης και της λειτουργικής εξοικονόμησης. Μια οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων ORC σε πλοίο μεταφοράς 3950 TEU σε πλεύση με υπηρεσιακή ταχύτητα 23.7 κόμβων,η οπία επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας 32.7 MW (δηλαδή το 77% της κύριας μηχανής 42.5 MW) έδειξε ότι η ενσωμάτωση του ORC με θερμοηλεκτρικές γεννήτριες θα μπορούσε να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου κατά περίπου 1580 τόνους ετησίως και να εξοικονομήσει έως και 1.169 εκατομμύρια USD ετησίως σε κόστος καυσίμων και φόρους CO_2 [6]. Αυτές οι εξοικονομήσεις, σε συνδυασμό με τις μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθιστούν τα συστήματα ORC ελκυστική επένδυση για τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Παρά τα σημαντικά οφέλη, πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετές προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτηση των συστημάτων ORC στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αυτά περιλαμβάνουν την αρχική επένδυση κεφαλαίου, την ανάγκη για προηγμένα συστήματα ελέγχου για την αντιμετώπιση δυναμικών συνθηκών λειτουργίας και την επιλογή των κατάλληλων ρευστών εργασίας για την εξισορρόπηση της απόδοσης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Οι μελλοντικές προοπτικές για συστήματα ORC σε ναυτιλιακές εφαρμογές είναι ελπιδοφόρες, με τη συνεχιζόμενη έρευνα να επικεντρώνεται στη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος, στη μείωση του κόστους και στην ενίσχυση της λειτουργικής ευελιξίας. Οι πρόοδοι στην επιστήμη των υλικών, τις τεχνολογίες ελέγχου και την ολοκλήρωση συστημάτων θα ενισχύσουν περαιτέρω τη βιωσιμότητα των συστημάτων ORC για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας στα πλοία.

6.3.3 Ατμογεννήτρια ανάκτησης θερμότητας

Οι γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας (HRSG) είναι προηγμένα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας από τα καυσαέρια του κινητήρα του πλοίου για την παραγωγή ατμού. Αυτός ο ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές επί του σκάφους, βελτιώνοντας σημαντικά την ενεργειακή απόδοση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων.

Τα συστήματα HRSG έχουν σχεδιαστεί για να συλλέγουν την απορριπτόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια των μηχανών, ιδιαίτερα των αεριοστροβίλων, και να τη χρησιμοποιούν για την παραγωγή ατμού. Τα βασικά στοιχεία ενός HRSG περιλαμβάνουν τα ακόλουθα [69]:

Economizer: Προθερμαίνει το νερό τροφοδοσίας πριν εισέλθει στο τμήμα του εξατμιστή χρησιμοποιώντας τα καυσαέρια χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Εξατμιστήρας: Μετατρέπει το προθερμασμένο νερό τροφοδοσίας σε ατμό χρησιμοποιώντας τα καυσαέρια υψηλότερης θερμοκρασίας.

Υπερθερμαντήρας: Θερμαίνει περαιτέρω τον ατμό σε υψηλότερη θερμοκρασία και πίεση, ενισχύοντας το ενεργειακό του περιεχόμενο για χρήση σε τουρμπίνες ή άλλες εφαρμογές.

Το HRSG λειτουργεί περνώντας τα καυσαέρια μέσω αυτών των τμημάτων διαδοχικά, μεγιστοποιώντας την ανάκτηση θερμότητας και την παραγωγή ατμού.

Πλεονεκτήματα Συστημάτων HRSG

- Απόδοση καυσίμου και εξοικονόμηση κόστους: Τα συστήματα HRSG μειώνουν σημαντικά την ποσότητα καυσίμου που απαιτείται για την παραγωγή ατμού για τις λειτουργίες του πλοίου ανακτώντας την απορριπτόμενη θερμότητα. Αυτό οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους και βελτιωμένη συνολική απόδοση καυσίμου. Οι μελέτες δείχνουν ότι τα συστήματα HRSG μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση καυσίμου έως και 15%, ανάλογα με το λειτουργικό προφίλ του πλοίου. Αυτό το κέρδος απόδοσης μεταφράζεται σε σημαντική ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου, η οποία μπορεί να αντισταθμίσει την αρχική επένδυση μέσα σε λίγα χρόνια [61].

- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Τα συστήματα HRSG συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου. Αυτό είναι κρίσιμο για τη συμμόρφωση με τους διεθνείς ναυτιλιακούς κανονισμούς, όπως ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) του IMO και το όριο θείου 2020. Με την ελαχιστοποίηση της χρήσης καυσίμου, τα συστήματα HRSG μειώνουν τις εκπομπές CO_2, NO_x και SO_x, συμβάλλοντας στις παγκόσμιες προσπάθειες για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα [34].

- Λειτουργική ευελιξία: Τα συστήματα HRSG είναι ευέλικτα και μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορους τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, των δεξαμενόπλοιων, των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου και των κρουαζιερόπλοιων. Η ικανότητά τους να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά τα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας από τους αεριοστρόβιλους τους καθιστά ιδιαίτερα πολύτιμους στις ρυθμίσεις ισχύος συνδυασμένου κύκλου. Αυτή η ευελιξία διασφαλίζει ότι τα συστήματα HRSG μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικούς σχεδιασμούς πλοίων και λειτουργικές απαιτήσεις, παρέχοντας ευρεία εφαρμογή σε όλη τη ναυτιλιακή βιομηχανία [69].

Οικονομική Αξιολόγηση-Προκλήσεις

Η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων HRSG εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το κόστος εγκατάστασης, οι απαιτήσεις συντήρησης και η πιθανή εξοικονόμηση καυσίμου. Το κόστος εγκατάστασης για συστήματα HRSG μπορεί να κυμαίνεται από 5.000.000 $ έως 10.000.000 $ ανά πλοίο, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Το ετήσιο κόστος συντήρησης εκτιμάται ότι είναι περίπου $20.000 έως $40.000 ανά πλοίο [34].

Οι οικονομικές αξιολογήσεις έχουν δείξει ότι η εξοικονόμηση καυσίμων και η λειτουργική απόδοση που επιτυγχάνεται μέσω των συστημάτων HRSG μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές οικονομικές αποδόσεις. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση συστημάτων HRSG σε μεγάλα πλοία, όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και κρουαζιερόπλοια,

μπορεί να οδηγήσει σε ετήσια εξοικονόμηση καυσίμων εκατοντάδων χιλιάδων δολαρίων, ανάλογα με το λειτουργικό προφίλ του σκάφους και τις τιμές των καυσίμων. Αυτές οι εξοικονομήσεις, σε συνδυασμό με το μειωμένο κόστος συντήρησης και τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, καθιστούν τα συστήματα HRSG ελκυστική επιλογή για τους πλοιοκτήτες που θέλουν να βελτιώσουν τη βιωσιμότητα και την κερδοφορία των σκαφών τους .

Η εφαρμογή συστημάτων HRSG περιλαμβάνει πολλές τεχνικές προκλήσεις, όπως η ενσωμάτωση με τα υπάρχοντα συστήματα, η συντήρηση και η λειτουργική ευελιξία. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι κρίσιμης σημασίας για τη μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων της τεχνολογίας HRSG [72].

Η ενσωμάτωση συστημάτων HRSG σε υπάρχουσες διαμορφώσεις πλοίων μπορεί να είναι πολύπλοκη, απαιτώντας σημαντικές τροποποιήσεις στη διάταξη του πλοίου. Αυτό περιλαμβάνει τη διασφάλιση ότι η ροή των καυσαερίων κατευθύνεται κατάλληλα μέσω του HRSG και τη διαχείριση των πρόσθετων απαιτήσεων βάρους και χώρου. Τα σύγχρονα σχέδια HRSG είναι αρθρωτά και συμπαγή, διευκολύνοντας την ευκολότερη ενσωμάτωση σε διάφορους τύπους πλοίων. Τα προηγμένα εργαλεία προσομοίωσης και μοντελοποίησης μπορούν να βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης και του σχεδιασμού των συστημάτων HRSG για την ελαχιστοποίηση των χώρων και τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας [73] .

Η τακτική συντήρηση επίσης είναι σημαντική για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής λειτουργίας των συστημάτων HRSG. Αυτό περιλαμβάνει περιοδικές επιθεωρήσεις, καθαρισμό επιφανειών εναλλαγής θερμότητας και παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος. Τα προηγμένα διαγνωστικά εργαλεία και οι τεχνολογίες πρόβλεψης συντήρησης μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας και να εξασφαλίσουν αξιόπιστη λειτουργία. Για παράδειγμα, τα αυτοματοποιημένα συστήματα καθαρισμού μπορούν να μειώσουν τη συσσώρευση αιθάλης και άλλων εναποθέσεων σε επιφάνειες εναλλάκτη θερμότητας, διατηρώντας τη βέλτιστη απόδοση μεταφοράς θερμότητας .

Τα συστήματα HRSG πρέπει να είναι σχεδιασμένα για να χειρίζονται ποικίλα μεγέθη ισχύος κινητήρων και συνθήκες λειτουργίας. Αυτό απαιτεί εξελιγμένα συστήματα ελέγχου που μπορούν να προσαρμόσουν τη λειτουργία του HRSG για να βελτιστοποιήσουν την ανάκτηση θερμότητας και την παραγωγή ατμού κάτω από διαφορετικά σενάρια. Αυτά τα συστήματα ελέγχου ενισχύουν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των λειτουργιών HRSG διασφαλίζοντας ότι το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί στις αλλαγές στην απόδοση του κινητήρα και στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση προηγμένων υλικών που αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες και διαβρωτικά περιβάλλοντα μπορεί να βελτιώσει την ανθεκτικότητα και την απόδοση των συστημάτων HRSG [61].

Το μέλλον των συστημάτων HRSG σε ναυτιλιακές εφαρμογές φαίνεται πολλά υποσχόμενο, με τη συνεχή έρευνα και ανάπτυξη να επικεντρώνεται στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, στη μείωση του κόστους και στην ενίσχυση της λειτουργικής

ευελιξίας. Καινοτομίες όπως προηγμένα υλικά για εναλλάκτες θερμότητας, βελτιωμένα συστήματα ελέγχου και υβριδικές διαμορφώσεις που συνδυάζουν το HRSG με άλλες τεχνολογίες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας αναμένεται να οδηγήσουν σε περαιτέρω προόδους σε αυτόν τον τομέα.

6.4 Ανάκτηση από συστήματα ψύξης κινητήρα (Engine Cooling Systems)

Τα συστήματα ψύξης κινητήρα είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση της θερμικής ενέργειας που παράγεται από τους κινητήρες των πλοίων. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν ψύξη νερού με μανδύα, ψύκτες αέρα φόρτισης και ψύκτες λαδιού λίπανσης. Κάθε ένα από αυτά τα συστατικά απορροφά σημαντικές ποσότητες θερμότητας, παρουσιάζοντας μια ουσιαστική ευκαιρία για ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας.

Τα συστήματα ψύξης νερού με μανδύα κυκλοφορούν το νερό γύρω από το μπλοκ του κινητήρα για να απορροφήσουν τη θερμότητα από τη διαδικασία καύσης, διατηρώντας τη βέλτιστη θερμοκρασία του κινητήρα. Το νερό του μανδύα λειτουργεί συνήθως σε θερμοκρασίες μεταξύ 70°C και 90°C, παρέχοντας μια πηγή θερμότητας μέτριας θερμοκρασίας κατάλληλη για διάφορες εφαρμογές WHR. Η δεσμευμένη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προθέρμανση καυσίμου, για οικιακή θέρμανση ή συστήματα ψύξης με απορρόφηση οδήγησης.

Οι ψύκτες αέρα φόρτισης μειώνουν τη θερμοκρασία του πεπιεσμένου αέρα από τους στροβιλοσυμπιεστές πριν εισέλθει στους κυλίνδρους του κινητήρα, βελτιώνοντας την απόδοση του κινητήρα και την απόδοση ισχύος. Αυτό το σύστημα αντιμετωπίζει υψηλές θερμοκρασίες, που συχνά υπερβαίνουν τους 200°C, καθιστώντας το ιδανικό για την παραγωγή ατμού σε λέβητες.

Οι ψύκτες λιπαντικού λαδιού διατηρούν τη θερμοκρασία του λιπαντικού λαδιού του κινητήρα, η οποία είναι απαραίτητη για τη μείωση της τριβής και της φθοράς. Η θερμοκρασία του λιπαντικού λαδιού είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με άλλα συστήματα ψύξης, συνήθως γύρω στους 50°C, καθιστώντας το λιγότερο σημαντική πηγή ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας. Ωστόσο, μπορεί να συμπληρώσει άλλα συστήματα WHR.

6.4.1 Ψύξη με απορρόφηση (Absorption Cooling)

Τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση βασίζονται στη χρήση δύο βασικών ουσιών: του ψυκτικού υγρού και του απορροφητικού διαλύματος. Το πλέον διαδεδομένο ζεύγος είναι το νερό (H_2O) και το βρωμιούχο λίθιο (LiBr). Η λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα στάδια:

1. **Εξατμιστής**: Το ψυκτικό υγρό εξατμίζεται υπό χαμηλή πίεση στον εξατμιστή, απορροφώντας θερμότητα από το περιβάλλον και προκαλώντας ψύξη. Ο εξατμιστής

λειτουργεί σε θερμοκρασίες περίπου 5-10°C, δημιουργώντας ένα περιβάλλον ψύξης για την απορρόφηση θερμότητας.

2. **Απορροφητή**: Οι ατμοί του ψυκτικού απορροφώνται από το διάλυμα, παράγοντας θερμότητα που απομακρύνεται μέσω ενός συστήματος ψύξης. Η θερμοκρασία λειτουργίας στον απορροφητή κυμαίνεται από 30-40°C.

3. **Γεννήτρια**: Το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου και νερού θερμαίνεται στη γεννήτρια με τη χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας από τους κινητήρες του πλοίου, προκαλώντας εξάτμιση του νερού. Η γεννήτρια λειτουργεί σε θερμοκρασίες από 80°C έως 150°C, ανάλογα με την ποιότητα της απορριπτόμενης θερμότητας.

4. **Συμπυκνωτής**: Οι ατμοί του νερού συμπυκνώνονται στον συμπυκνωτή και επιστρέφουν στον εξατμιστή για να ξεκινήσει ξανά ο κύκλος. Η θερμοκρασία στον συμπυκνωτή είναι συνήθως γύρω στους 30-40°C.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν δείκτη απόδοσης (COP) που κυμαίνεται από 0.6 έως 1.2, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και την ποιότητα της απορριπτόμενης θερμότητας [74] [75]. Ο δείκτης απόδοσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων ψύξης, με υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα.

Πλεονεκτήματα της Ψύξης με Απορρόφηση στα Πλοία

Η ψύξη με απορρόφηση προσφέρει πολυάριθμα πλεονεκτήματα στα πλοία:

1. **Ενεργειακή Απόδοση**: Η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας αυξάνει την ενεργειακή απόδοση των πλοίων, μειώνοντας την ανάγκη για επιπλέον καύσιμα. Συστήματα με υψηλό δείκτη απόδοσης μπορούν να μετατρέψουν μεγάλο μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας σε χρήσιμη ψύξη.

2. **Περιβαλλοντικά Οφέλη**: Μειώνοντας την ανάγκη για επιπλέον καύσιμα, οι εκπομπές CO_2 και άλλων ρύπων μειώνονται σημαντικά. Έτσι, τα συστήματα αυτά συμβάλλουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πλοίων.

3. **Μείωση Κόστους**: Η χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας μειώνει το κόστος λειτουργίας, καθώς μειώνεται η κατανάλωση καυσίμων και οι λειτουργικές δαπάνες. Σύμφωνα με μελέτες, τα πλοία που χρησιμοποιούν συστήματα ψύξης με απορρόφηση μπορούν να επιτύχουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους σε βάθος χρόνου [76].

4. **Αξιοπιστία και Συντήρηση**: Τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση είναι απλά στη λειτουργία και απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα ψύξης, γεγονός που μειώνει τα κόστη συντήρησης και αυξάνει τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

Η ψύξη με απορρόφηση μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα σημεία εντός του πλοίου:

- **Ψύξη Εσωτερικών Χώρων**: Η ψύξη των χώρων διαβίωσης και εργασίας του πληρώματος είναι κρίσιμη για την άνεση και την αποδοτικότητα του προσωπικού. Τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση μπορούν να διατηρούν σταθερές θερμοκρασίες σε όλους τους χώρους του πλοίου.
- **Ψύξη Καταψυκτών**: Σε πλοία που μεταφέρουν ευπαθή προϊόντα, η χρήση απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να εξασφαλίσει σταθερές θερμοκρασίες στους καταψύκτες, μειώνοντας τα κόστη ψύξης και αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση.
- **Ψύξη Μηχανών**: Η ψύξη των μηχανών είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής τους. Τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας από τις μηχανές, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για επιπλέον ψύξη με καύσιμα.

Περιπτώσεις Μελέτης

Η εταιρεία COOL4SEA αναπτύσσει καινοτόμα συστήματα που χρησιμοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα από τους κινητήρες των πλοίων για την ψύξη των χώρων διαβίωσης. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν διάλυμα λιθίου-βρωμιδίου και χαρακτηρίζονται από την απλότητα, την αξιοπιστία και τη χαμηλή συντήρησή τους [76]. Το σύστημα της COOL4SEA έχει δείκτη απόδοσης (COP) περίπου 0.7-0.9 και μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά με θερμοκρασίες απορριπτόμενης θερμότητας από 80°C έως 120°C.

Νέα συστήματα ψύξης με απορρόφηση, όπως αυτά που περιγράφονται από τους Ayou και Coronas (2020) [77], ενσωματώνουν τεχνολογίες όπως η χρήση νανορευστών για τη βελτίωση της απόδοσης. Σε πειραματικές μελέτες, η προσθήκη νανοσωματιδίων Al_2O_3 και CNT στο διάλυμα βρωμιούχου λιθίου αύξησε την απόδοση έως και 6% σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν βελτιωμένη θερμική αγωγιμότητα και μεγαλύτερη απορρόφηση θερμότητας, γεγονός που αυξάνει την αποδοτικότητά τους.

6.4.2 Ψύξη με προσρόφηση (Adsorption Cooling)

Η τεχνολογία ψύξης με προσρόφηση προσφέρει μια εναλλακτική και ενεργειακά αποδοτική μέθοδο εκμετάλλευσης της απορριπτόμενης θερμότητας στα πλοία. Σε αντίθεση με την ψύξη με απορρόφηση, η προσρόφηση χρησιμοποιεί στερεά προσροφητικά υλικά για την πρόσληψη και απελευθέρωση του ψυκτικού υγρού. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση και να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, προσφέροντας σημαντικά οφέλη στη ναυτιλία.

Τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση βασίζονται στη χρήση στερεών προσροφητικών υλικών όπως ο ενεργός άνθρακας, ο ζεόλιθος και η σιλικαζέλ, σε συνδυασμό με ψυκτικά υγρά όπως η αμμωνία ή το νερό. Η λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. **Προσρόφηση**: Κατά τη διάρκεια της προσρόφησης, το στερεό προσροφητικό υλικό προσροφά το ψυκτικό υγρό από τον εξατμιστή, προκαλώντας ψύξη. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα υπό χαμηλή πίεση και θερμοκρασία, συνήθως μεταξύ 5-10°C.

2. **Αναγέννηση**: Στη φάση της αναγέννησης, το προσροφητικό υλικό θερμαίνεται χρησιμοποιώντας την απορριπτόμενη θερμότητα από τους κινητήρες του πλοίου ή άλλες πηγές θερμότητας. Η θερμοκρασία της αναγέννησης μπορεί να κυμαίνεται από 70°C έως 200°C, ανάλογα με το είδος του προσροφητικού υλικού και του ψυκτικού υγρού.

3. **Συμπύκνωση**: Οι ατμοί του ψυκτικού υγρού που απελευθερώνονται κατά την αναγέννηση μεταφέρονται στον συμπυκνωτή, όπου συμπυκνώνονται σε υγρή μορφή και επιστρέφουν στον εξατμιστή για να ξεκινήσει ξανά ο κύκλος.

4. **Εξάτμιση**: Το ψυκτικό υγρό στον εξατμιστή απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον, προκαλώντας ψύξη και επιστρέφει στη φάση της προσρόφησης.

Τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση παρουσιάζουν δείκτη απόδοσης (COP) που κυμαίνεται από 0.3 έως 0.6, ανάλογα με το είδος των υλικών και τις συνθήκες λειτουργίας. Ο δείκτης απόδοσης είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων ψύξης, με υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα.

Πλεονεκτήματα της Ψύξης με Προσρόφηση στα Πλοία

Η ψύξη με προσρόφηση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στα πλοία:

1. **Ενεργειακή Απόδοση**: Η χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας για την αναγέννηση των προσροφητικών υλικών αυξάνει την ενεργειακή απόδοση του πλοίου. Αυτό μειώνει την ανάγκη για επιπλέον καύσιμα και βελτιώνει τη συνολική απόδοση.

2. **Περιβαλλοντικά Οφέλη**: Η μειωμένη κατανάλωση καυσίμων οδηγεί σε μείωση των εκπομπών CO_2 και άλλων ρύπων, συμβάλλοντας στην προστασία του περιβάλλοντος. Τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση δεν χρησιμοποιούν CFCs ή HCFCs, τα οποία είναι επιβλαβή για το στρώμα του όζοντος.

3. **Αυξημένη Αξιοπιστία**: Τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση είναι λιγότερο ευαίσθητα σε διακοπές και αστοχίες, καθώς δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη ή συμπιεστές, γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία τους και μειώνει την ανάγκη για συντήρηση. Παρόλα αυτά η απόδοσή τους εξαρτράται πολύ από την κίνηση του πλοίου ενώ δεν είναι καθόλου αποδοτικά σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

4. **Ευελιξία στη Χρήση Υλικών**: Η χρήση διάφορων προσροφητικών υλικών και ψυκτικών υγρών επιτρέπει την προσαρμογή των συστημάτων στις συγκεκριμένες ανάγκες και συνθήκες λειτουργίας των πλοίων.

Εφαρμογές της Ψύξης με Προσρόφηση στα Πλοία

Η ψύξη με προσρόφηση μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα σημεία στα πλοία:

- **Ψύξη Εσωτερικών Χώρων**: Η ψύξη των χώρων διαβίωσης και εργασίας του πληρώματος είναι κρίσιμη για την άνεση και την αποδοτικότητα του προσωπικού. Τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση μπορούν να διατηρούν σταθερές θερμοκρασίες σε όλους τους χώρους του πλοίου.
- **Ψύξη Μηχανών**: Η ψύξη των μηχανών είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής τους. Τα συστήματα ψύξης με προσρόφηση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας από τις μηχανές, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για επιπλέον ψύξη με καύσιμα και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση του πλοίου.

Περιπτώσεις Μελέτης

Οι σύγχρονες τεχνολογίες ψύξης με προσρόφηση έχουν βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με μελέτες, η χρήση νανοσωματιδίων σε απορροφητικά υλικά έχει αυξήσει την αποδοτικότητα και την ικανότητα απορρόφησης των συστημάτων [78]. Τα νανοσωματίδια βελτιώνουν τη θερμική αγωγιμότητα των απορροφητικών υλικών, επιτρέποντας ταχύτερη και πιο αποτελεσματική αναγέννηση.

Μια μελέτη που διεξήχθη από την εταιρεία Sailcool ανέπτυξε ένα προσαρμοσμένο σύστημα ψύξης με προσρόφηση για τη ναυτιλία. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ζεόλιθο και νερό ως απορροφητικό και ψυκτικό υγρό, αντίστοιχα. Το σύστημα έχει δείκτη απόδοσης (COP) 0.5 και μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά με θερμοκρασίες απορριπτόμενης θερμότητας από 90°C έως 150°C [79].

Σύμφωνα με έρευνα που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό *Renewable Energy*, η ψύξη με προσρόφηση παρουσιάζει προκλήσεις όπως η βελτίωση της αποδοτικότητας και η μείωση του κόστους παραγωγής των απορροφητικών υλικών [80]. Η έρευνα δείχνει ότι η χρήση προηγμένων μεθόδων και υλικών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση και την οικονομικότητα των συστημάτων.

6.5 Ανάκτηση από άλλα βοηθητικά συστήματα (Other Auxiliary Systems)

6.5.1 Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες (Thermoelectric Generators -TEGs):

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEGs) αποτελούν μια αποτελεσματική λύση για την εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας στα πλοία. Αυτές οι συσκευές μετατρέπουν τη θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φαινομένου Seebeck, όπου η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο σημεία ενός θερμοηλεκτρικού υλικού παράγει ηλεκτρική τάση.

Τα TEGs αποτελούνται από θερμοηλεκτρικά υλικά όπως το βισμούθιο τελλουρίδιο (Bi_2Te_3). Όταν αυτά τα υλικά υποβάλλονται σε διαφορά θερμοκρασίας, δημιουργούν ηλεκτρική τάση και παράγουν ρεύμα. Η θερμότητα από τις μηχανές και άλλα συστήματα του πλοίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει τα TEGs, μετατρέποντας την απορριπτόμενη θερμότητα σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια.

Σύμφωνα με έρευνες, οι TEGs μπορούν να ανακτήσουν περίπου 5-10% της απορριπτόμενης θερμότητας από τις μηχανές, βελτιώνοντας την συνολική ενεργειακή απόδοση κατά 2-5% [81]. Οι TEGs χρησιμοποιούν τον θερμοηλεκτρικό συντελεστή (ZT), ο οποίος είναι μέτρο της απόδοσης των θερμοηλεκτρικών υλικών. Υλικά με υψηλό ZT, όπως το Bi_2Te_3, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην μετατροπή θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Πλεονεκτήματα των TEGs στα Πλοία

Η εφαρμογή των TEGs στα πλοία προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα [82]:

1. **Αυξημένη Ενεργειακή Απόδοση**: Οι TEGs μπορούν να αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση των πλοίων εκμεταλλευόμενα την απορριπτόμενη θερμότητα που διαφορετικά θα χανόταν, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμων και το κόστος λειτουργίας.

2. **Μείωση Εκπομπών**: Η αυξημένη αποδοτικότητα σημαίνει λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων, κάτι που είναι κρίσιμο για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλίας. Στοιχεία δείχνουν ότι η χρήση TEGs μπορεί να συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών CO_2 κατά 20%.

3. **Αξιοπιστία και Συντήρηση**: Οι TEGs δεν περιλαμβάνουν κινούμενα μέρη, καθιστώντας τα λιγότερο ευαίσθητα σε βλάβες και μειώνοντας την ανάγκη για συντήρηση. Αυτό αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος και μειώνει τα λειτουργικά κόστη.

4. **Ευελιξία και Εφαρμογές**: Τα TEGs μπορούν να προσαρμοστούν για να χρησιμοποιούν διάφορες πηγές θερμότητας, όπως τα καυσαέρια από τις μηχανές και το σύστημα ψύξης. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για πολλές εφαρμογές στα πλοία, συμπεριλαμβανομένης της θέρμανσης και της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για βοηθητικά συστήματα.

Τα TEGs μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τομείς στα πλοία:

- **Ανάκτηση Θερμότητας από Καυσαέρια**: Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες μπορούν να εγκατασταθούν στους σωλήνες εξάτμισης για την ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια, μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση των συστημάτων του πλοίου.
- **Ανάκτηση Θερμότητας από Σύστημα Ψύξης**: Οι TEGs μπορούν να εγκατασταθούν στο σύστημα ψύξης των μηχανών για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, βελτιώνοντας έτσι την ενεργειακή αποδοτικότητα.
- **Παροχή Ενέργειας σε Βοηθητικά Συστήματα**: Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τους TEGs μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση βοηθητικών συστημάτων, όπως ο φωτισμός και τα συστήματα επικοινωνίας του πλοίου.

Τεχνολογικές Λύσεις και Παραδείγματα

Η Maine Maritime Academy, σε συνεργασία με την Thermoelectric Power Systems, LLC, έχει αναπτύξει συστήματα TEGs για ναυτιλιακές εφαρμογές από το 2008. Η έρευνα τους επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της απόδοσης των TEGs σε θαλάσσια περιβάλλοντα και την ανάπτυξη βέλτιστων υλικών και σχεδίων για χρήση σε πλοία .

Σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό *Applied Thermal Engineering*, η βελτιστοποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων των TEGs, όπως το πάχος και το μήκος των θερμοηλεκτρικών στοιχείων, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποδοτικότητα των συστημάτων. Η χρήση προηγμένων αλγορίθμων για την βελτιστοποίηση της σχεδίασης έχει δείξει ότι η αποδοτικότητα των TEGs μπορεί να αυξηθεί έως και 15%.

Παρά τα πλεονεκτήματα, τα συστήματα TEGs αντιμετωπίζουν και προκλήσεις:

- **Χαμηλή Απόδοση Μετατροπής**: Η απόδοση μετατροπής της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι ακόμα σχετικά χαμηλή, με τους καλύτερους TEGs να φτάνουν αποδοτικότητα περίπου 5-10%. Η έρευνα συνεχίζεται για την ανάπτυξη υλικών με υψηλότερο θερμοηλεκτρικό συντελεστή (ZT).
- **Κόστος Υλικών**: Τα υλικά υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούνται στους TEGs, όπως το βισμούθιο τελλουρίδιο, είναι ακριβά, καθιστώντας την αρχική εγκατάσταση δαπανηρή. Ωστόσο, η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής και να βελτιώσει την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων TEGs.

6.5.2 Ενίσχυση Κύκλου Συμπίεσης Ατμών (Vapor Compression Cycle Enhancement)

Ο κύκλος συμπίεσης ατμών (Vapor Compression Cycle - VCC) είναι η κυρίαρχη τεχνολογία για συστήματα ψύξης και κλιματισμού, συμπεριλαμβανομένων των ναυτιλιακών εφαρμογών. Η ενίσχυση αυτού του κύκλου μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή

αποδοτικότητα, να μειώσει τις εκπομπές ρύπων και να μειώσει το κόστος λειτουργίας των πλοίων.

Ο κύκλος συμπίεσης ατμών περιλαμβάνει τέσσερα κύρια στάδια: συμπίεση, συμπύκνωση, επέκταση και εξάτμιση. Ο κύριος σκοπός αυτού του κύκλου είναι η μεταφορά θερμότητας από μια περιοχή χαμηλής θερμοκρασίας σε μια περιοχή υψηλής θερμοκρασίας μέσω της χρήσης ενός ψυκτικού μέσου. Η απόδοση του συστήματος μετράται συνήθως μέσω του συντελεστή απόδοσης (Coefficient of Performance - COP).

Τεχνολογικές Βελτιώσεις στον Κύκλο Συμπίεσης Ατμών

- **Χρήση Νανοσωματιδίων :** Η προσθήκη νανοσωματιδίων σε ψυκτικά υγρά και λιπαντικά έχει δείξει ότι μπορεί να βελτιώσει την θερμική αγωγιμότητα και την αποδοτικότητα του κύκλου. Μελέτες δείχνουν ότι η χρήση νανοσωματιδίων αλουμίνας (Al_2O_3) σε συνδυασμό με παραδοσιακά ψυκτικά μέσα μπορεί να αυξήσει την απόδοση του συστήματος έως και 15% .
- **Υγροποίηση με Ejector :** Ένας άλλος τρόπος βελτίωσης είναι η χρήση εκτοξευτήρων για την υγροποίηση του ψυκτικού μέσου. Η προσθήκη εκτοξευτήρων στον κύκλο συμπίεσης ατμών μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος, μειώνοντας την απώλεια ενέργειας και αυξάνοντας την αποδοτικότητα έως και 20% [83].
- **Εναλλακτικά Ψυκτικά Μέσα:** Η αντικατάσταση των παραδοσιακών ψυκτικών μέσων με αυτά που έχουν χαμηλό δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης (GWP) είναι κρίσιμη. Ψυκτικά μέσα όπως το R1234yf και το R1234ze προσφέρουν σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές ρύπων και έχουν καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ψυκτικά μέσα όπως το R134a [84].

Η ενίσχυση του κύκλου συμπίεσης ατμών προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στα πλοία:

- **Αυξημένη Ενεργειακή Απόδοση**: Οι βελτιώσεις στον κύκλο συμπίεσης ατμών μπορούν να αυξήσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμων και το κόστος λειτουργίας.
- **Μείωση Εκπομπών**: Η χρήση πιο αποδοτικών ψυκτικών μέσων και τεχνολογιών μειώνει τις εκπομπές CO_2 και άλλων ρύπων, συμβάλλοντας στην προστασία του περιβάλλοντος.
- **Αξιοπιστία και Συντήρηση**: Τα βελτιωμένα συστήματα είναι πιο αξιόπιστα και απαιτούν λιγότερη συντήρηση, μειώνοντας τα λειτουργικά κόστη.

Εφαρμογές

Ένα παράδειγμα είναι η χρήση εκτοξευτήρων σε συστήματα ψύξης θαλάσσιων εφαρμογών, τα οποία έχουν δείξει ότι μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση έως και 20% [85].

Η εφαρμογή νανολιπαντικών σε συστήματα ψύξης πλοίων έχει δείξει σημαντική βελτίωση στην απόδοση και τη μείωση της φθοράς των εξαρτημάτων, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του συστήματος.

6.6 Διαμορφώσεις πλοίου και τεχνολογίες ανάκτησης

6.6.1 Τυπική Διαμόρφωση πλοίου

Μια τυπική διαμόρφωση πλοίου περιλαμβάνει διάφορα συστήματα σχεδιασμένα να διασφαλίζουν αποτελεσματική πρόωση, παραγωγή ενέργειας, ψύξη και άλλες ζωτικής σημασίας λειτουργίες. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν τον Κύριο κινητήρα (Main Engine - M/E), τις Γεννήτριες Ντίζελ (Diesel Generators -D/G), τα κυκλώματα ψύξης με μανδύα (Jacket Cooling Circuits), τα συστήματα λαδιού (Oils Systems) και τα κυκλώματα ψύξης θαλασσινού νερού (Seawater Cooling Circuits).

- Κύριος κινητήρας (M/E): Η κύρια μηχανή (M/E) είναι η κύρια μονάδα πρόωσης σε ένα πλοίο, συνήθως ένας μεγάλος δίχρονος κινητήρας ντίζελ. Αυτοί οι κινητήρες έχουν σχεδιαστεί για υψηλή απόδοση και αξιοπιστία, μετατρέποντας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε μηχανική ενέργεια για την κίνηση της προπέλας του πλοίου. Η απόδοση του M/E είναι κρίσιμη για τη συνολική απόδοση και το λειτουργικό κόστος του σκάφους. Οι σύγχρονοι πετρελαιοκινητήρες θαλάσσης είναι εξοπλισμένοι με προηγμένες τεχνολογίες για τη βελτίωση της απόδοσης καύσης και τη μείωση των εκπομπών, σύμφωνα με τους κανονισμούς του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO).

- Γεννήτριες Diesel (D/G): Οι γεννήτριες ντίζελ (D/G) παρέχουν την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ για τις λειτουργίες του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου του φωτισμού, του εξοπλισμού πλοήγησης και των βοηθητικών μηχανημάτων. Αυτές οι γεννήτριες είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της συνεχούς τροφοδοσίας, ειδικά κατά τη διάρκεια ελιγμών ή όταν ο κύριος κινητήρας δεν λειτουργεί. Οι γεννήτριες ντίζελ στα πλοία είναι συνήθως τετράχρονοι κινητήρες και έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με πετρέλαιο ντίζελ πλοίων (MDO) ή βαρύ μαζούτ (HFO). Λειτουργούν επίσης ως εφεδρική πηγή ισχύος σε περίπτωση κύριας βλάβης του κινητήρα .

- Κύκλωμα ψύξης μανδύα: Το κύκλωμα ψύξης του μανδύα είναι ένα απαραίτητο σύστημα για τη διατήρηση της βέλτιστης θερμοκρασίας λειτουργίας του κύριου κινητήρα. Αυτό το σύστημα κυκλοφορεί ψυκτικό, συνήθως γλυκό νερό, γύρω από τις επενδύσεις των κυλίνδρων, τις κυλινδροκεφαλές και τις βαλβίδες εξαγωγής του κινητήρα για να απορροφήσει τη θερμότητα που παράγεται κατά την καύση. Το θερμαινόμενο ψυκτικό στη συνέχεια διέρχεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας όπου ψύχεται από θαλασσινό νερό πριν ανακυκλωθεί. Αυτό το σύστημα αποτρέπει την υπερθέρμανση και τη θερμική καταπόνηση στα εξαρτήματα του κινητήρα,

διασφαλίζοντας αποτελεσματική και αξιόπιστη απόδοση του κινητήρα. Το σύστημα ψύξης νερού με χιτώνιο περιλαμβάνει εξαρτήματα όπως αντλίες κυκλοφορίας, ψύκτες, δεξαμενές διαστολής και απαεριστές για την αφαίρεση του αέρα από το ψυκτικό υγρό .

- Συστήματα λαδιών: Τα συστήματα πετρελαίου στα πλοία εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της λίπανσης, της ψύξης και του καθαρισμού των εξαρτημάτων του κινητήρα. Το σύστημα λίπανσης διασφαλίζει ότι όλα τα κινούμενα μέρη του κινητήρα λιπαίνονται επαρκώς για τη μείωση της τριβής και της φθοράς. Το λιπαντικό λάδι βοηθά επίσης στην ψύξη των εξαρτημάτων του κινητήρα απορροφώντας τη θερμότητα που παράγεται από την τριβή. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται φίλτρα λαδιού και διαχωριστές για την αφαίρεση ρύπων από το λάδι, διατηρώντας την ποιότητά του και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του κινητήρα. Το σύστημα λίπανσης περιλαμβάνει συνήθως αντλίες, φίλτρα, ψύκτες και δεξαμενές λαδιού .

- Κύκλωμα ψύξης θαλασσινού νερού: Το κύκλωμα ψύξης με θαλασσινό νερό παίζει ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας των μηχανημάτων του πλοίου. Το θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο λόγω της διαθεσιμότητας και της αποτελεσματικότητάς του στην απαγωγή θερμότητας. Το σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού τυπικά περιλαμβάνει μια σειρά από εναλλάκτες θερμότητας όπου η θερμότητα από το νερό του μανδύα, το λιπαντικό λάδι και άλλα συστήματα μεταφέρεται στο θαλασσινό νερό. Το ψυχρό γλυκό νερό στη συνέχεια ανακυκλώνεται πίσω στο σύστημα. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει ότι το μηχάνημα λειτουργεί εντός του βέλτιστου εύρους θερμοκρασίας, αποτρέποντας την υπερθέρμανση και βελτιώνοντας την απόδοση. Τα εξαρτήματα του κυκλώματος ψύξης θαλασσινού νερού περιλαμβάνουν αντλίες θαλασσινού νερού, φίλτρα, εναλλάκτες θερμότητας και εξόδους εκκένωσης στη θάλασσα [86].

- Κεντρικά Συστήματα Ψύξης: Τα σύγχρονα πλοία χρησιμοποιούν συχνά συστήματα κεντρικής ψύξης που ενοποιούν τις διαδικασίες ψύξης σε ένα ενιαίο σύστημα, βελτιώνοντας την απόδοση και μειώνοντας τη συντήρηση. Σε ένα κεντρικό σύστημα ψύξης, ένας ή δύο μεγάλοι εναλλάκτες θερμότητας εξοπλισμένοι με ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά όπως το τιτάνιο χρησιμοποιούνται για την ψύξη του γλυκού νερού που κυκλοφορεί μέσω διαφόρων υποσυστημάτων. Το κεντρικό σύστημα ψύξης περιλαμβάνει συνήθως το σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας γλυκού νερού (FW-LT) και το σύστημα υψηλής θερμοκρασίας γλυκού νερού (FW-HT). Το σύστημα FW-LT ψύχει εξαρτήματα όπως οι ψύκτες λαδιού λίπανσης και οι ψύκτες αέρα καθαρισμού, ενώ το σύστημα FW-HT ψύχει τις επενδύσεις των κυλίνδρων και τις κεφαλές του κύριου κινητήρα. Η συγκέντρωση αυτών των συστημάτων μειώνει την πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις χώρου μεμονωμένων μονάδων ψύξης .

6.6.2 Διαφορές στη διαμόρφωση ανά κατηγορία πλοίου

Η διαμόρφωση των πλοίων ποικίλλει σημαντικά μεταξύ διαφορετικών κατηγοριών, λόγω των ειδικών επιχειρησιακών απαιτήσεών τους, των τύπων φορτίου και των περιβαλλοντικών κανονισμών. Η κατανόηση αυτών των διαφορών είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της απόδοσης και της αποδοτικότητας του πλοίου. Παρακάτω αναφέρονται οι τυπικές διαμορφώσεις διαφόρων κατηγοριών πλοίων, εστιάζοντας στους κύριους κινητήρες, τις γεννήτριες ντίζελ, τα συστήματα ψύξης και άλλα κρίσιμα μέρη τους.

Πλοία εμπορευματοκιβωτίων

- Κύρια μηχανή (M/E): Τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων είναι εξοπλισμένα με μεγάλους δίχρονους κινητήρες ντίζελ που παρέχουν την απαραίτητη ισχύ για την πρόωση. Αυτοί οι κινητήρες έχουν σχεδιαστεί για υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής. Το μέγεθος του κινητήρα και η ισχύς εξόδου είναι προσαρμοσμένα στη χωρητικότητα του πλοίου, η οποία μπορεί να κυμαίνεται από μικρά πλοία τροφοδοσίας έως εξαιρετικά μεγάλα πλοία εμπορευματοκιβωτίων (ULCV) ικανά να μεταφέρουν πάνω από 20.000 TEU (αντίστοιχες μονάδες είκοσι ποδιών) [87]

- Γεννήτριες ντίζελ (D/G): Τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων απαιτούν στιβαρά βοηθητικά συστήματα ισχύος για να χειρίζονται τα εκτεταμένα ηλεκτρικά φορτία από ψυκτικά εμπορευματοκιβώτια (reefers) και άλλα ενσωματωμένα συστήματα. Συνήθως, χρησιμοποιούνται πολλαπλές γεννήτριες ντίζελ για την εξασφάλιση αξιόπιστης τροφοδοσίας, με πλεονασμό ενσωματωμένο στο σύστημα για την αποφυγή διακοπών ρεύματος.

- Συστήματα ψύξης: Αυτά τα πλοία χρησιμοποιούν κεντρικά συστήματα ψύξης όπου το θαλασσινό νερό ψύχει το γλυκό νερό που κυκλοφορεί μέσω διαφόρων συστημάτων πλοίων, συμπεριλαμβανομένης της κύριας μηχανής και των βοηθητικών μηχανημάτων. Το σύστημα περιλαμβάνει κυκλώματα υψηλής θερμοκρασίας (HT) και χαμηλής θερμοκρασίας (LT) για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας ψύξης [86].

Δεξαμενόπλοια

- Κύρια μηχανή (M/E): Τα δεξαμενόπλοια, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων μεταφοράς αργού πετρελαίου και των δεξαμενόπλοιων προϊόντων, χρησιμοποιούν επίσης μεγάλους δίχρονους κινητήρες ντίζελ για πρόωση. Ωστόσο, η εστίαση είναι στη βελτιστοποίηση της απόδοσης καυσίμου και στη διασφάλιση ασφαλών λειτουργιών λόγω της επικίνδυνης φύσης του φορτίου τους. Η ισχύς του κινητήρα είναι γενικά χαμηλότερη σε σύγκριση με πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων παρόμοιου μεγέθους, αντανακλώντας τις διαφορετικές επιχειρησιακές ταχύτητες και τις απαιτήσεις οικονομίας καυσίμου [88].

- Γεννήτριες Diesel (D/G): Τα βυτιοφόρα διαθέτουν πολλαπλές γεννήτριες ντίζελ για την υποστήριξη των εκτεταμένων συστημάτων ασφάλειας και λειτουργίας επί του πλοίου, όπως συστήματα αδρανούς αερίου, αντλίες φορτίου και συστήματα θέρμανσης για το φορτίο.

- Συστήματα ψύξης: Τα συστήματα ψύξης στα δεξαμενόπλοια είναι παρόμοια με αυτά των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αλλά μπορεί να περιλαμβάνουν πρόσθετα χαρακτηριστικά για τη διαχείριση των απαιτήσεων θέρμανσης για το φορτίο. Τα συστήματα ψύξης με θαλασσινό νερό είναι κρίσιμα για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του κύριου κινητήρα και άλλων μηχανημάτων.

Bulk Carriers

- Κύρια μηχανή (M/E): Τα φορτηγά χύδην φορτίου έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν μη συσκευασμένο χύδην φορτίο όπως άνθρακα, μετάλλευμα και σιτηρά. Συνήθως χρησιμοποιούν μεγάλους δίχρονους κινητήρες ντίζελ που παρέχουν ισορροπία μεταξύ ισχύος και απόδοσης καυσίμου. Οι κινητήρες είναι βελτιστοποιημένοι για τις χαμηλότερες ταχύτητες που είναι τυπικές για τις λειτουργίες μεταφοράς χύδην φορτίου [88].

- Γεννήτριες Diesel (D/G): Αυτά τα πλοία έχουν λιγότερες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια σε σύγκριση με τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, γεγονός που οδηγεί σε απλούστερα βοηθητικά συστήματα ισχύος. Ωστόσο, εξακολουθούν να απαιτούν αξιόπιστες γεννήτριες ντίζελ για την τροφοδοσία του εξοπλισμού διακίνησης φορτίου και άλλων βασικών συστημάτων.

- Συστήματα ψύξης: Οι μεταφορείς χύδην χρησιμοποιούν κεντρικά συστήματα ψύξης με κυκλώματα HT και LT. Τα συστήματα ψύξης πρέπει να χειρίζονται τη θερμότητα που παράγεται από τους μεγάλους κινητήρες και τα βοηθητικά μηχανήματα, διασφαλίζοντας αποτελεσματική απαγωγή θερμότητας και λειτουργική αξιοπιστία [86].

Επιβατηγά Πλοία (Κρουαζιερόπλοια)

- Κύριος κινητήρας (M/E): Τα κρουαζιερόπλοια χρησιμοποιούν κινητήρες ντίζελ μέσης ταχύτητας ή, όλο και περισσότερο, κινητήρες διπλού καυσίμου που μπορούν να λειτουργούν τόσο με πετρέλαιο ντίζελ πλοίων (MDO) όσο και με υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Αυτοί οι κινητήρες έχουν σχεδιαστεί για υψηλή απόδοση και χαμηλές εκπομπές ρύπων για να πληρούν τους αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς [89].

- Γεννήτριες Ντίζελ (D/G): Τα κρουαζιερόπλοια έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια λόγω των εκτεταμένων ξενοδοχειακών υπηρεσιών, των συστημάτων ψυχαγωγίας και άλλων ανέσεων. Πολλαπλές γεννήτριες ντίζελ

παρέχουν την απαραίτητη ισχύ, με εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας για τη βελτιστοποίηση της χρήσης καυσίμου και τη μείωση των εκπομπών.

- Συστήματα ψύξης: Τα συστήματα ψύξης στα κρουαζιερόπλοια είναι πολύπλοκα, με πολλαπλά κυκλώματα HT και LT για τη διαχείριση των διαφορετικών αναγκών ψύξης των κινητήρων, των βοηθητικών συστημάτων και των εγκαταστάσεων επί του σκάφους. Τα συστήματα πρέπει επίσης να διασφαλίζουν την άνεση των επιβατών διατηρώντας τις βέλτιστες θερμοκρασίες σε όλο το σκάφος.

6.6.3 Τεχνολογίες εκμετάλλευσης απορριπτόμενης θερμότητα ανά είδος πλοίου

Η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας στα πλοία όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι σημαντική για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Διάφορες τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, καθεμία με μοναδικές επιχειρησιακές απαιτήσεις και διαμορφώσεις. Παρακάτω γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των τεχνολογιών εκμετάλλευσης απορριπτόμενης θερμότητας (WHR) για ορισμένες κατηγορίες πλοίων, αναλύοντας τις δυνατότητές τους και τις διαφορές στις εφαρμογές τους.

Πλοία εμπορευματοκιβωτίων

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χαρακτηρίζονται από τις υψηλές απαιτήσεις ισχύος τους λόγω της ανάγκης για συνεχή πρόωση και των ηλεκτρικών απαιτήσεων των εμπορευματοκιβωτίων ψύξης (reefers). Οι κύριες πηγές απορριπτόμενης θερμότητας σε αυτά τα δοχεία περιλαμβάνουν τον κύριο και τους βοηθητικούς κινητήρες.

- EGE: Τα EGEs χρησιμοποιούνται συνήθως σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων για την ανάκτηση θερμότητας από την κύρια εξαγωγή του κινητήρα. Ο παραγόμενος ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς θέρμανσης ή για οδήγηση ατμοστροβίλων για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική λόγω των υψηλών και σχετικά σταθερών φορτίων του κινητήρα κατά τη διάρκεια μεγάλων θαλάσσιων ταξιδιών [90].

- Συστήματα οργανικού κύκλου Rankine (ORC): Τα συστήματα ORC κερδίζουν έδαφος στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων για την ικανότητά τους να μετατρέπουν χαμηλής ποιότητας απορριπτόμενη θερμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί οργανικά υγρά με χαμηλά σημεία βρασμού, κατάλληλα για τα ποικίλα επίπεδα θερμότητας που υπάρχουν σε αυτά τα πλοία.

- Θερμοηλεκτρικές Γεννήτριες (TEG): Τα TEG, αν και λιγότερο αποδοτικά, χρησιμοποιούνται για την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας από βοηθητικά συστήματα. Η εφαρμογή τους είναι σημαντική για τη βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης χωρίς σημαντικές επιπτώσεις χώρου ή βάρους [62].

Δεξαμενόπλοια

Τα δεξαμενόπλοια, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορέων αργού πετρελαίου και προϊόντων, έχουν διακριτά επιχειρησιακά προφίλ που επηρεάζουν την εφαρμογή των τεχνολογιών WHR. Λειτουργούν με χαμηλότερες ταχύτητες σε σύγκριση με τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, οδηγώντας σε διαφορετικές ευκαιρίες ανάκτησης θερμότητας [90].

- Λέβητες καυσαερίων: Τα δεξαμενόπλοια συχνά χρησιμοποιούν λέβητες καυσαερίων για την ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια της κύριας μηχανής. Ο παραγόμενος ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση φορτίου, ειδικά για παχύρρευστα φορτία όπως το αργό πετρέλαιο που απαιτούν διατηρούμενες θερμοκρασίες.

- Συστήματα ORC: Τα συστήματα ORC είναι επίσης κατάλληλα για δεξαμενόπλοια, όπου μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη θερμότητα χαμηλότερης θερμοκρασίας από τους βοηθητικούς κινητήρες και τα συστήματα ψύξης. Αυτό βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων, ευθυγραμμίζοντας με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

Bulk Carriers

Τα φορτηγά χύδην φορτίου, τα οποία μεταφέρουν μη συσκευασμένο χύδην φορτίο, όπως άνθρακας και σιτηρά, έχουν συνήθως απλούστερες διαμορφώσεις, αλλά εξακολουθούν να παρουσιάζουν ευκαιρίες για ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας.

- EGE: Παρόμοια με τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου μπορούν να επωφεληθούν από τα EGEs για την ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια της κύριας μηχανής. Η απλότητα και η αξιοπιστία αυτών των συστημάτων τα καθιστούν ιδανικά για φορτηγά χύδην φορτίου, τα οποία συχνά έχουν εκτεταμένες περιόδους σταθερής λειτουργίας.

- TEGs: Λόγω των γενικά χαμηλότερων ηλεκτρικών απαιτήσεων σε σύγκριση με τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα TEG μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από βοηθητικούς κινητήρες και άλλα ενσωματωμένα συστήματα.

Επιβατηγά Πλοία (Κρουαζιερόπλοια)

Τα κρουαζιερόπλοια έχουν πολύπλοκες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω των εκτεταμένων υπηρεσιών που παρέχονται στους επιβάτες. Η εφαρμογή των τεχνολογιών WHR σε αυτά τα πλοία μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοση.

- Συστήματα Συνδυασμένης Θερμότητας και Ισχύος (CHP): Τα συστήματα CHP είναι πολύ αποτελεσματικά σε κρουαζιερόπλοια, αξιοποιώντας τη θερμότητα από τους κύριους και βοηθητικούς κινητήρες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την

παροχή θέρμανσης στις εγκαταστάσεις του πλοίου. Η ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων βοηθά στη διαχείριση των ποικίλων ενεργειακών αναγκών του πλοίου.

- Συστήματα ORC: Τα συστήματα ORC μπορούν να μετατρέψουν την απορριπτόμενη θερμότητα από τους κύριους και βοηθητικούς κινητήρες σε ηλεκτρική ενέργεια, συμβάλλοντας στο συνολικό ενεργειακό δίκτυο του πλοίου. Αυτό είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο δεδομένων των υψηλών απαιτήσεων συνεχούς ισχύος των κρουαζιερόπλοιων.
- Γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας (HRSG): Οι HRSG χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια των αεριοστροβίλων, συνηθισμένο στη σύγχρονη πρόωση κρουαζιερόπλοιων. Ο ατμός που παράγεται χρησιμοποιείται για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

7 Εφαρμογές κύκλου ORC σε πλοία

Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στην εκτενή διερεύνηση της χρήσης των συστημάτων οργανικού κύκλου Rankine (ORC) στον τομέα της ναυτιλίας, προσφέροντας λεπτομερείς περιγραφές και ποικίλα παραδείγματα που αναδεικνύουν επιτυχημένες εφαρμογές. Στο επίκεντρο βρίσκονται τα τεχνικά ζητήματα των εφαρμογών και της άρτιας ενσωμάτωσης των συστημάτων ORC σε ένα φάσμα πλοίων, που περιλαμβάνει επιβατηγά πλοία, φορτηγά πλοία και ερευνητικά σκάφη.

Κατά την εξέταση των μηχανικών προκλήσεων που είναι εγγενείς στη διαδικασία εγκατάστασης, γίνεται προσπάθεια για να συμπεριλάβει τις βέλτιστες πρακτικές και τις εκτιμήσεις που σχετίζονται με τη βέλτιστη διαστασιολόγηση των πλοίων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην παρουσίαση συγκεκριμένων περιπτώσεων και μελέτης περιπτώσεων που προέρχονται από διάφορους τομείς της ναυτιλιακής βιομηχανίας, εμπλουτίζοντας έτσι την ανάλυση.

Επιπλέον, τα παραδείγματα επιλέχθηκαν για να συμπεριλάβουν τεχνολογίες αιχμής, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε πραγματικές περιπτώσεις, αναδεικνύοντας το ρόλο τους στην επίτευξη όχι μόνο βελτιωμένης αποδοτικότητας καυσίμου αλλά και σημαντικών μειώσεων στις εκπομπές και αυξημένης συνολικής ενεργειακής απόδοσης.

7.1 Το Arnold Maersk

Το πρόσφατα ανεπτυγμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας από απορριπτόμενη θερμότητα της Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery & Engine (MHI-MME), το Hydrocurrent Organic Rankine Cycle (ORC) Module 125EJW, έχει τεθεί σε λειτουργία στο πλοίο Arnold Maersk της Maersk Line. Το σύστημα ORC, το οποίο αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την Calnetix Technologies, αξιοποιεί θερμότητα χαμηλής θερμοκρασίας από διάφορες πηγές, όπως το νερό ψύξης του μανδύα της κύριας μηχανής, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [91] [92].

Το σύστημα ORC μπορεί να μειώσει σημαντικά το φορτίο της κύριας γεννήτριας του πλοίου, μειώνοντας τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και ενισχύοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου. Είναι εξοπλισμένο με μια καινοτόμο ακτινική τουρμπίνα, που αναπτύχθηκε από την MHI-MME, και είναι τοποθετημένη στο πρότυπο σύστημα ανάκτησης θερμότητας της Calnetix.

Η εγκατάσταση του συστήματος Hydrocurrent ORC στο πλοίο Arnold Maersk έχει αποδειχθεί αποτελεσματική, με την απόδοση του συστήματος να φτάνει τα 125 kW. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα οργανικό θερμικό μέσο με χαμηλό σημείο βρασμού ως εργαζόμενο ρευστό, το οποίο μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ισχύ και εν τέλει σε ηλεκτρική ενέργεια [93].

Το σύστημα όχι μόνο αξιοποιεί την απορριπτόμενη θερμότητα από το νερό ψύξης, αλλά και από άλλες πηγές θερμότητας στο πλοίο, όπως τα καυσαέρια της κύριας μηχανής και οι ψύκτες αέρα, που παραδοσιακά δεν ήταν διαθέσιμες για τη λειτουργία των συμβατικών ατμοστροβίλων. Αυτό καθιστά το σύστημα ιδιαίτερα αποδοτικό και σημαντικό για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των πλοίων.

Η επιτυχία της εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος Hydrocurrent ORC επιβεβαιώθηκε μετά από εκτεταμένες δοκιμές στο εργοστάσιο της Calnetix Technologies, οι οποίες οδήγησαν στην έγκριση του συστήματος από την Nippon Kaiji Kyokai (NK) και την Lloyd's Register of Shipping

Εικόνα 18: Το φορτηγό πλοίο Arnold Maersk [91]

Εικόνα 19: Μονάδα 125EJW HydrocurrentTM Organic Rankine Cycle (ORC) (το "Hydrocurrent" είναι εμπορικό σήμα της Calnetix Technologies) [92]

7.2 Το MS - Birka στην Βαλτική Θάλασσα

Η Βαλτική Θάλασσα είναι μία από τις πιο πολυσύχναστες θαλάσσιες περιοχές στον κόσμο, με τον όγκο της ναυσιπλοΐας να αυξάνεται σύμφωνα με την παγκόσμια οικονομία. Ωστόσο, είναι μια στενή και ρηχή θάλασσα, γεγονός που σημαίνει ότι οι εκπομπές από τις θαλάσσιες μεταφορές ανά τετραγωνικό μέτρο είναι περίπου 245% υψηλότερες από τον παγκόσμιο μέσο όρο. Από την 1η Ιανουαρίου 2015, η Βαλτική Θάλασσα έχει χαρακτηριστεί ως περιοχή ελέγχου εκπομπών θείου (SECA), όπου η περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων που χρησιμοποιούνται δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1% [94].

Το επιχειρησιακό προφίλ του M/S Birka Stockholm επικεντρώνεται στη μεταφορά επιβατών μεταξύ Στοκχόλμης (Σουηδία) και Mariehamn (Φινλανδία). Η συνολική απόσταση ενός ταξιδιού χωρίς επιστροφή είναι περίπου 170 ναυτικά μίλια (314,8 χλμ.) και διαρκεί περίπου 12 ώρες. Περισσότερο από το 50% του ταξιδιού διέρχεται από το "αρχιπέλαγος της Στοκχόλμης", το οποίο αποτελείται από περισσότερα από 24.000 νησιά, ενώ το υπόλοιπο πραγματοποιείται στην ανοικτή Βαλτική Θάλασσα. Αυτό επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του πλοίου, καθώς η ταχύτητα και η ικανότητα ελιγμών περιορίζονται από τα στενά περάσματα και το δύσβατο περιβάλλον του αρχιπελάγους.

Το M/S Birka πλέει με ταχύτητα χαμηλότερη από εκείνη του σχεδιασμού. Κατά συνέπεια, οι δύο κύριες μηχανές λειτουργούν ταυτόχρονα. Ακόμα και όταν το πλοίο διέρχεται από τη

Στοκχόλμη, οι δύο μηχανές είναι απαραίτητες για την υποστήριξη των ελιγμών. Στην ανοικτή θάλασσα, το πλοίο πλέει με σταθερή, υψηλή ταχύτητα, αλλά το φορτίο των μηχανών είναι συνήθως κάτω από το 50% της ταχύτητας σχεδιασμού. Οι βοηθητικές μηχανές λειτουργούν με φορτίο μεταξύ 30% και 70%, ανάλογα με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

Το M/S Birka είναι ένα επιβατηγό κρουαζιερόπλοιο με σύστημα πρόωσης που αποτελείται από τέσσερις κύριες μηχανές (ME) Wärtsilä 6L46B, καθεμία με ονομαστική ισχύ 5850 kW (συνολική ονομαστική ισχύς 23.400 kW). Οι μηχανές είναι τετράχρονες, υπερτροφοδοτούμενες με ενδιάμεση ψύξη, και χρησιμοποιούν καύσιμο Marine Gas Oil αναμεμειγμένο με βαρύ καύσιμο πετρελαίου. Ο αέρας εισαγωγής συμπιέζεται μέσω του υπερσυμπιεστή που τροφοδοτείται από τα καυσαέρια.

Εικόνα 20: Το επιβατηγό κρουαζιερόπλοιο M/S Birka [95]

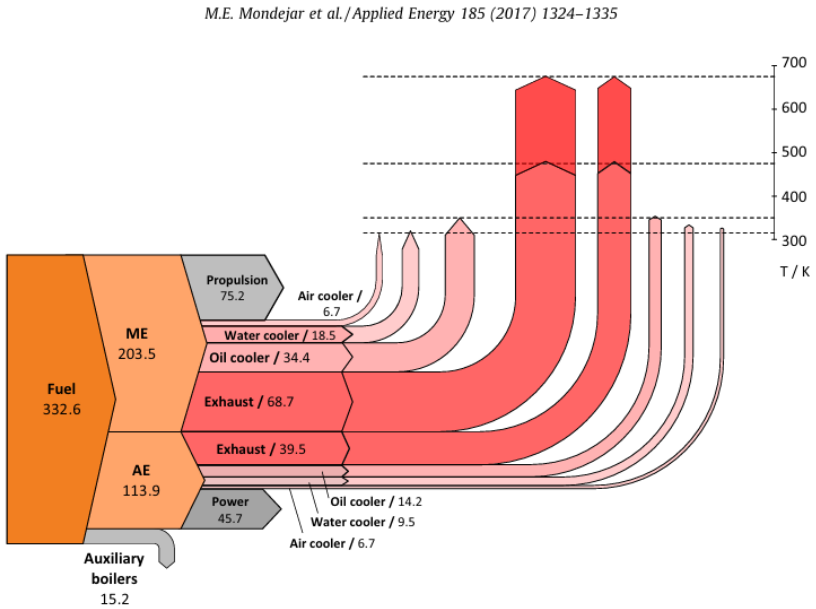
Οι μηχανές συνδέονται με ένα κιβώτιο ταχυτήτων που μεταφέρει την ισχύ σε δύο εξερχόμενους άξονες για την πρόωση του πλοίου. Οι έλικες είναι ελεγχόμενου βήματος (CPP) και το βήμα ελέγχεται αυτόματα από έναν ρυθμιστή για τη συγκεκριμένη ταχύτητα και τις συνθήκες φορτίου. Τέσσερις τετράχρονες υπερτροφοδοτούμενες βοηθητικές μηχανές ντίζελ Wärtsilä 6L32 χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ονομαστική ισχύ 2760 kW η καθεμία (συνολικά 11.040 kW).

Έξι λέβητες καυσαερίων (EGBO) ανακτούν θερμότητα από τα καυσαέρια για την παραγωγή ατμού που χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του HFO και για τις ανάγκες θέρμανσης των ξενοδοχειακών εγκαταστάσεων του πλοίου. Το διάγραμμα των κινητήρων δείχνει ότι περίπου το 59% της συνολικής ενέργειας του καυσίμου σπαταλιέται μέσω καυσαερίων και κυκλωμάτων ψύξης. Ενώ τα καυσαέρια αποτελούν περίπου το 32% της συνολικής ενέργειας

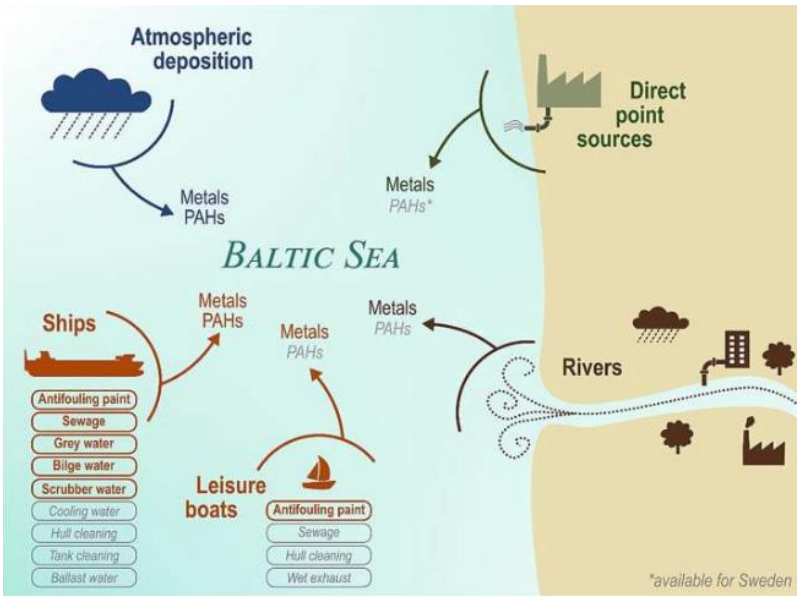
του καυσίμου, τα ρεύματα ψύξης έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία και δεν εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία λόγω της χαμηλής ροής θερμότητας.

Η Εικόνα 21 παρουσιάζει ένα απλουστευμένο διάγραμμα Sankey του ενεργειακού συστήματος του πλοίου, που αφορά τους κύριους και βοηθητικούς κινητήρες [18]. Δείχνει τα ενεργειακά ρεύματα αποβλήτων και τις θερμοκρασίες τους. Περίπου το 59% της συνολικής ενέργειας του καυσίμου σπαταλιέται μέσω καυσαερίων και κυκλωμάτων ψύξης. Τα καυσαέρια, που αντιπροσωπεύουν το 32% της ενέργειας, έχουν θερμοκρασίες 470-690 K, ενώ τα ρεύματα ψύξης είναι πολύ χαμηλότερα. Λόγω της χαμηλής θερμικής ροής τους, τα ρεύματα ψύξης δεν εξετάστηκαν ως πηγή θερμότητας, και μόνο τα καυσαέρια χρησιμοποιήθηκαν για το σύστημα ανάκτησης θερμότητας.

Η ανάγκη για μείωση των εκπομπών και βελτιστοποίηση της απόδοσης είναι επιτακτική. Νέα τεχνολογία όπως τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers) έχουν βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών θείου, αλλά η χρήση τους έχει δημιουργήσει νέα προβλήματα ρύπανσης των υδάτων με βαρέα μέταλλα και τοξικές οργανικές ενώσεις. Υπάρχουν προτάσεις για απαγόρευση των scrubbers στα εσωτερικά ύδατα της Βαλτικής, με σκοπό τη μείωση της αρνητικής περιβαλλοντικής επίπτωσης [96].



Εικόνα 21 Sankey diagram



Εικόνα 22: Γραφική απεικόνιση της ρύπανσης στα ύδατα της Βαλτικής [96]

7.3 Το MV Figaro

Το MV Figaro είναι ένα εξαιρετικά προηγμένο οχηματαγωγό πλοίο, σχεδιασμένο με στόχο την αποδοτικότητα καυσίμου και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Κατασκευασμένο από χάλυβα ναυτικής ποιότητας, το κύτος του MV Figaro έχει σχεδιαστεί σχολαστικά για να μειώσει την υδροδυναμική αντίσταση, εξασφαλίζοντας υψηλή αποδοτικότητα καυσίμου και ανθεκτικότητα σε απαιτητικά θαλάσσια περιβάλλοντα. Η χρήση υψηλής ποιότητας υλικών και η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών στην κατασκευή του πλοίου εξασφαλίζουν την ανθεκτικότητά του σε σκληρές θαλάσσιες συνθήκες, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του και μειώνοντας τα κόστη συντήρησης.

Εικόνα 23: Το οχηματαγωγό MV Figaro [97]

Η πρόωση του πλοίου επιτυγχάνεται μέσω ενός ισχυρού θαλάσσιου πετρελαιοκινητήρα MAN B&W 8S60ME-C8, ο οποίος παράγει 19.040 kW (25.533 ίππους). Αυτός ο κινητήρας όχι μόνο παρέχει την απαραίτητη ισχύ για την κίνηση του πλοίου, αλλά είναι επίσης σχεδιασμένος για μέγιστη αποδοτικότητα καυσίμου, μειώνοντας έτσι τα λειτουργικά κόστη και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, ο κινητήρας συνδέεται με το σύστημα Organic Rankine Cycle (ORC), το οποίο εκμεταλλεύεται την απορριπτόμενη θερμότητα από τον κινητήρα για να παράγει επιπλέον ενέργεια. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί οργανικά υγρά με χαμηλό σημείο βρασμού που μετατρέπουν την θερμική ενέργεια σε μηχανική και κατόπιν σε ηλεκτρική, ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση του πλοίου.

Το σύστημα ORC είναι καθοριστικό για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του MV Figaro. Χρησιμοποιεί την απορριπτόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια και το νερό ψύξης του κινητήρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλοίου. Αυτή η τεχνολογία συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO2. Επιπλέον, το σύστημα ORC βοηθά στη διαχείριση της θερμοκρασίας του κινητήρα, διασφαλίζοντας τη σταθερή λειτουργία του μειώνοντας τις φθορές.

Η δέσμευση του MV Figaro για περιβαλλοντική υπευθυνότητα είναι εμφανής. Το σύστημα ORC μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και προωθεί τη βιωσιμότητα. Επιπλέον, τα προηγμένα συστήματα ελέγχου της ρύπανσης που διαθέτει το πλοίο ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κάνοντάς το ένα από τα πιο πράσινα πλοία στον στόλο του. Τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers) αφαιρούν το θείο και άλλους ρύπους από τα καυσαέρια πριν αυτά απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα, μειώνοντας την ατμοσφαιρική ρύπανση και προστατεύοντας το θαλάσσιο περιβάλλον.

Το MV Figaro έχει σχεδιαστεί για τη μεταφορά οχημάτων και εμπορευμάτων, με τεράστια χωρητικότητα που διευκολύνει την παγκόσμια εφοδιαστική αλυσίδα. Με μήκος 232 μέτρα

και πλάτος 32 μέτρα, το πλοίο μπορεί να μεταφέρει έως και 7.425 αυτοκίνητα ή ισοδύναμο αριθμό φορτίου. Η ενσωμάτωση του συστήματος ORC συμβάλλει στην αύξηση της αποδοτικότητας, βελτιώνοντας την κατανάλωση ενέργειας κατά τη διάρκεια της διακίνησης φορτίου. Επιπλέον, η ανεπτυγμένη υποδομή του πλοίου επιτρέπει την ταχεία φόρτωση και εκφόρτωση, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται στα λιμάνια και βελτιώνοντας την συνολική απόδοση του δρομολογίου.

8 Οικονομοτεχνική Μελέτη

8.1 Σύντομη περιγραφή της μελέτης

8.1.1 Περιγραφή πλοίου μελέτης

Η παρούσα μελέτη διερευνά τα λειτουργικά δεδομένα ενός VLCC, κατά τη διάρκεια ενός έτους, από τον Σεπτέμβριο του 2021 έως τον Αύγουστο του 2022, τα οποία παρέχονται από την συνεργαζόμενη εταιρεία στο πλαίσιο του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα εν λόγω δεδομένα χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσδιοριστεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης των καυσαερίων σε αυτό το πλοίο μελέτης, σε όλο το εύρος των φορτίων της κύριας μηχανής. Ο Πίνακας 3 περιγράφει συνοπτικά το πλοίο, καθώς και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της κύριας μηχανής και των γεννητριών ντίζελ. Σημειώνεται ότι, η κύρια μηχανή χρησιμοποιείται για την πρόωση του πλοίου και οι γεννήτριες diesel για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών. Επιπλέον, υπάρχει και ένας βοηθητικός ατμολέβητας για την κάλυψη επιπρόσθετων θερμικών αναγκών.

ΠΛΟΙΟ	ΚΥΡΙΑ ΜΗΧΑΝΗ	
Τύπος πλοίου : Crude oil Carrier	Τύπος μηχανής:	RT-flex
DWT : 319368 tons	Αριθμός κυλίνδρων:	7
Μήκος πλοίου : 339,76 m	Turbochargers :	2
Διάμετρος προπέλας : 10 m	Ονομαστική Ισχύς :	32970 kW
Prop. Pitch: 6,913 m	Ονομαστική Ταχύτητα :	72 r/min
Βύθισμα σχεδίασης:22,28m		

Πίνακας 3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου πλοίου

8.1.2 Πορεία της έρευνας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται οι δυνατότητες εφαρμογής των συστημάτων ORC (Organic Rankine Cycle) σε πλοία, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Η έρευνα επικεντρώνεται στην ανάλυση πραγματικών δεδομένων από συγκεκριμένο πλοίο και στη διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της θερμότητας των καυσαερίων για την παραγωγή ενέργειας

μέσω ενός συστήματος ORC. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε προσεκτική επεξεργασία των δεδομένων του πλοίου που παρασχέθηκαν από την εταιρεία, με στόχο την επιλογή τους και την απομάκρυνση τυχόν ακραίων ή μη αποδεκτών τιμών. Αυτές οι τιμές είτε υπερέβαιναν τα όρια που είχαν τεθεί για την θερμοκρασια των καυσαερίων από τον κατασκευαστή, είτε δεν ανταποκρίνονταν στα κριτήρια της συγκεκριμένης έρευνας. Στη συνέχεια, επικεντρωθήκαμε στη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία του πλοίου σε πλήρη ταχύτητα, τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων και την ισχύ της κύριας μηχανής, με στόχο τον υπολογισμό του φορτίου.

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων, δημιουργήθηκαν αναλυτικά διαγράμματα, προκειμένου να αποτυπωθεί πιο σαφώς η λειτουργία του πλοίου υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες.

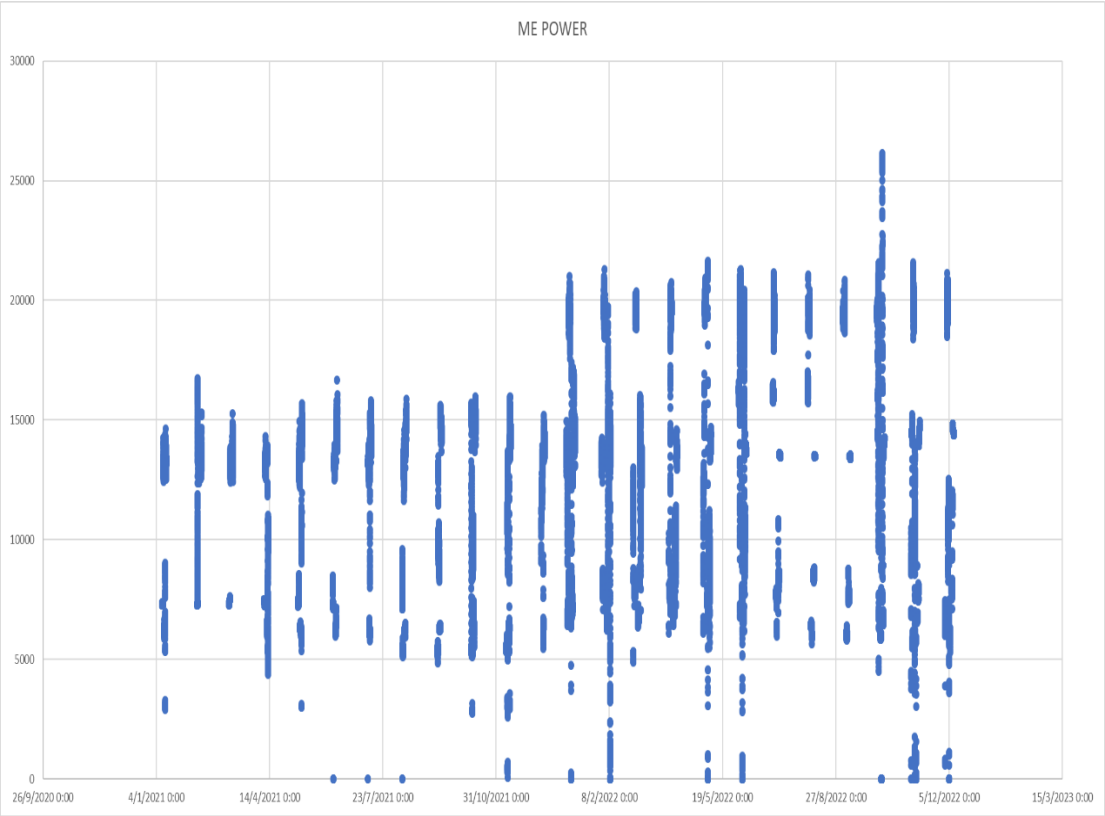
Εν συνεχεία, επιλέχθηκε ένας κινητήρας της MAN με παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτόν του πλοίου μελέτης, ώστε να αναπτυχθεί μια σχέση μεταξύ της ποσότητας και της θερμοκρασίας των καυσαερίων και του φορτίου, και να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα που είχαν συλλεχθεί. Αυτή η ανάλυση κρίθηκε απαραίτητη για τον υπολογισμό του ενεργειακού δυναμικού που μπορεί να ανακτηθεί από τα καυσαέρια. Στο τελικό στάδιο της έρευνας, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν εισήχθησαν σε ένα μοντέλο ORC, το οποίο προσαρμόστηκε στις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου, με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων που αφορούν την εξοικονόμηση καυσίμου. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την ενσωμάτωση συστημάτων ORC στην ναυτιλία, και συμβάλλουν στη διαμόρφωση στρατηγικών για την αποτελεσματικότερη χρήση της απορριπτόμενης ενέργειας.

8.1.3 Ανάλυση ταξιδιού

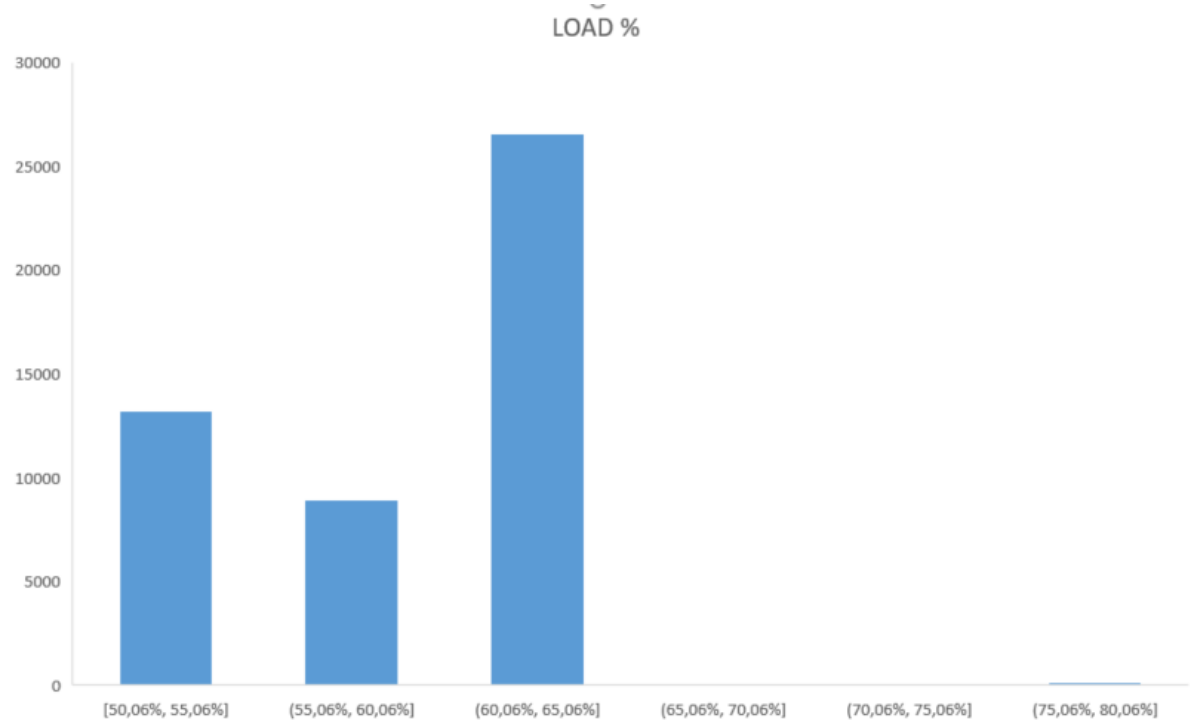
Η κατανόηση του ταξιδιού αποτελεί σημαντικό μέρος της έρευνας, δεδομένου ότι παρέχει κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του κύριου κινητήρα. Σημειώνεται ότι το σκάφος ταξίδευε κυρίως στο Ινδικό Ωκεανό, ενώ για μια περίοδο άνω των 3 μηνών βρισκόταν στον Ειρηνικό και τον Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό. Η τοποθεσία μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τα σημεία δεδομένων γεωγραφικού πλάτους και μήκους. Με βάση τα αρχεία, στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται όλες οι καταστάσεις ισχύος του πλοίου σε σχέση με την ημερομηνία του ταξιδιού. Αναφέρεται ότι η κατάσταση πλεύσης με πλήρη ταχύτητα εμπρός, η οποία αντιστοιχεί σε 15,5 kn, επιλέγεται ως κατάσταση αναφοράς για αυτή τη μελέτη λόγω των υψηλών ταχυτήτων του πλοίου και, ως εκ τούτου, των υψηλών φορτίων της κύριας μηχανής που εμφανίζονται σε αυτή την κατάσταση.

Στην Εικόνα 26 απεικονίζονται επίσης οι κανονικές κατανομές της ταχύτητας του πλοίου τόσο για τα φορτωμένα όσο και για τα μη φορτωμένα ταξίδια, με το φορτίο να υπολογίζεται έμμεσα χρησιμοποιώντας το μέσο βύθισμα του πλοίου και την κατάσταση φορτίου που ορίζεται με τον καθορισμό ενός ορίου όσον αφορά το βάρος του φορτίου 100.000 μετρικών τόνων.

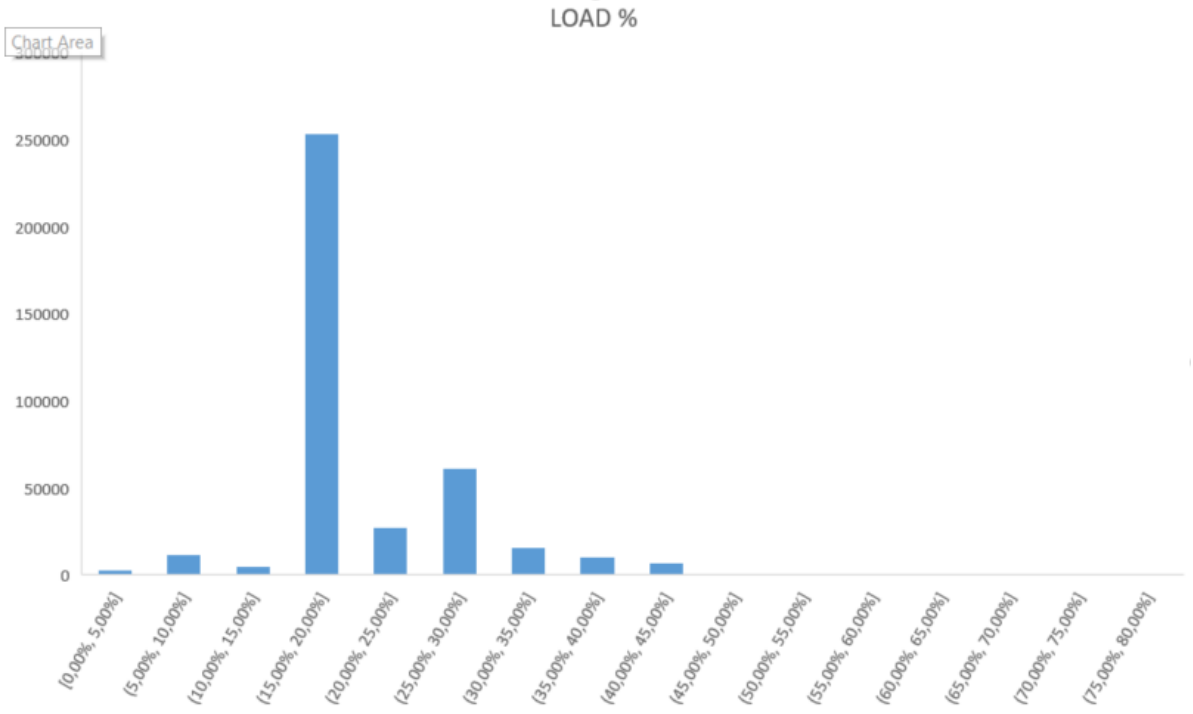
Οι Εικόνες 24 και 25 παρουσιάζουν μια σύντομη ανάλυση των ταξιδιών κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου και φαίνεται ότι το πλοίο έχει μέγιστο φορτίο κινητήρα 80,06 % μόνο κατά τη διάρκεια ενός μόνο σημείου δεδομένων (Εικόνα 17). Το μέσο φορτίο της κύριας μηχανής φορτωμένο είναι 45,6%.



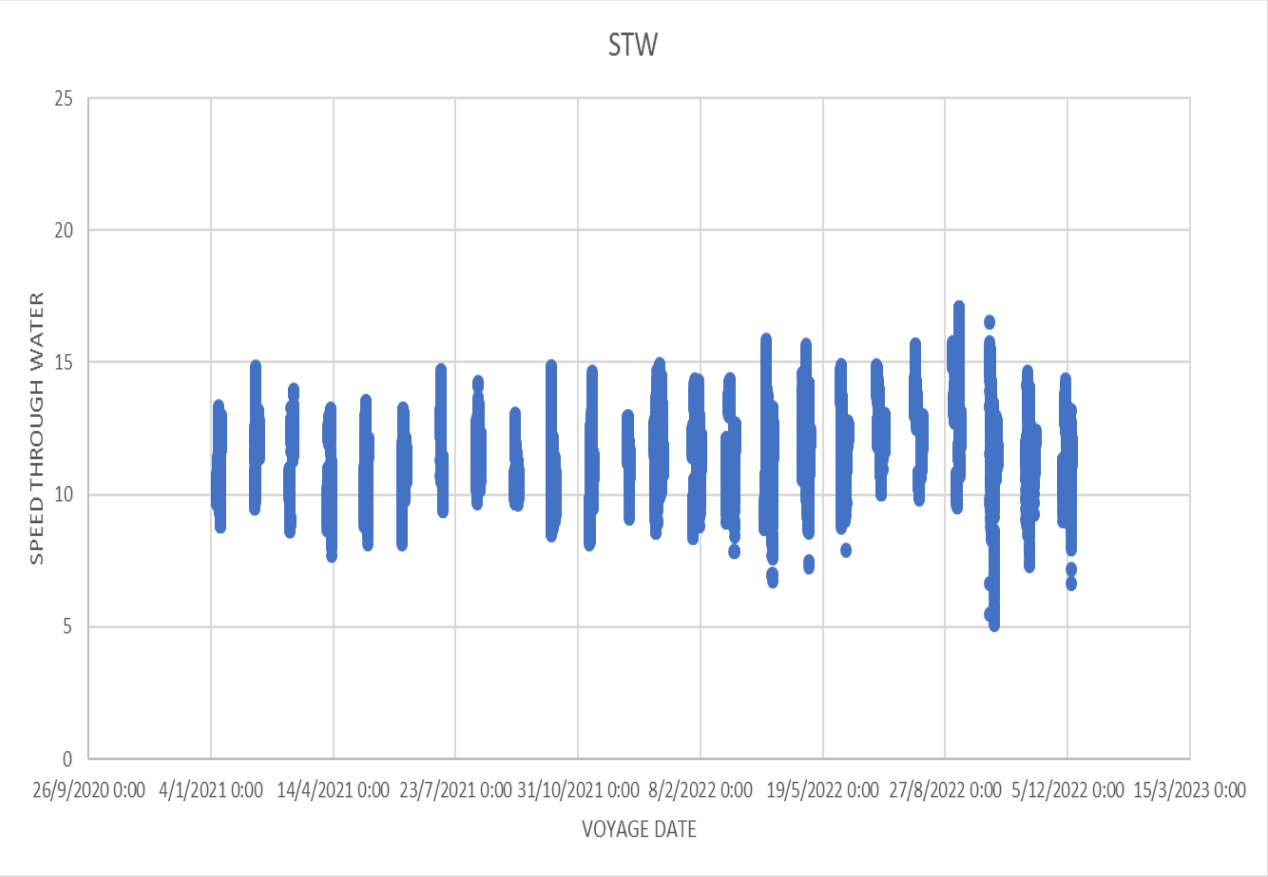
Εικόνα 24: Απεικόνιση της ισχύος της κύριας μηχανής κατα την διάρκεια των ταξιδιών



Εικόνα 25 **Κατανομή για υψηλά φορτία**



Εικόνα 26 **Κατανομή ποσοστού του φορτίου της Κ/Μ**



Εικόνα 27: Η κατανομή των ταχυτήτων στα έμφορτα ταξίδια.

8.1.4 Στόχοι της έρευνας

Οι στόχοι αυτής της εργασίας επικεντρώνονται στην εξέταση του δυναμικού ενέργειας μιας μηχανής με τη χρήση συστημάτων κύκλου Rankine. Μελετώντας την απόδοση της μηχανής με αυτήν την μέθοδο, αυτή η εργασία στοχεύει να κατανοήσει πλήρως τις δυνατότητες της μηχανής στη μετατροπή ενέργειας από τα καυσαέρια και να βελτιστοποιήσει την απόδοσή της, μειώνοντας το φορτίο που πρέπει να καλύψουν οι βοηθητικές μηχανές. Επιπλέον, εξετάζει την οικονομικοτεχνική πλευρά της μελέτης, αξιολογώντας το κόστος, τα οφέλη και τη βιωσιμότητα της εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας, συγκρίνοντας βιβλιογραφικά δεδομένα με τα πραγματικά που μας παρέχουν τα καταγραφικά συστήματα. Με αυτήν την εργασία, γίνεται μια προσπάθεια να προωθηθεί η κατανόηση της ενεργειακής απόδοσης μηχανών και να συμβάλουν στην ανάπτυξη πιο βιώσιμων ενεργειακών λύσεων για το μέλλον, καθώς και να γίνει αντιληπτό το κατά πόσο τα συστήματα ORC μπορούν να εφαρμοστούν ευρέως και σε μεγαλύτερα project στη ναυτιλία.

8.2 Σχεδιασμός και έλεγχος συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ORC

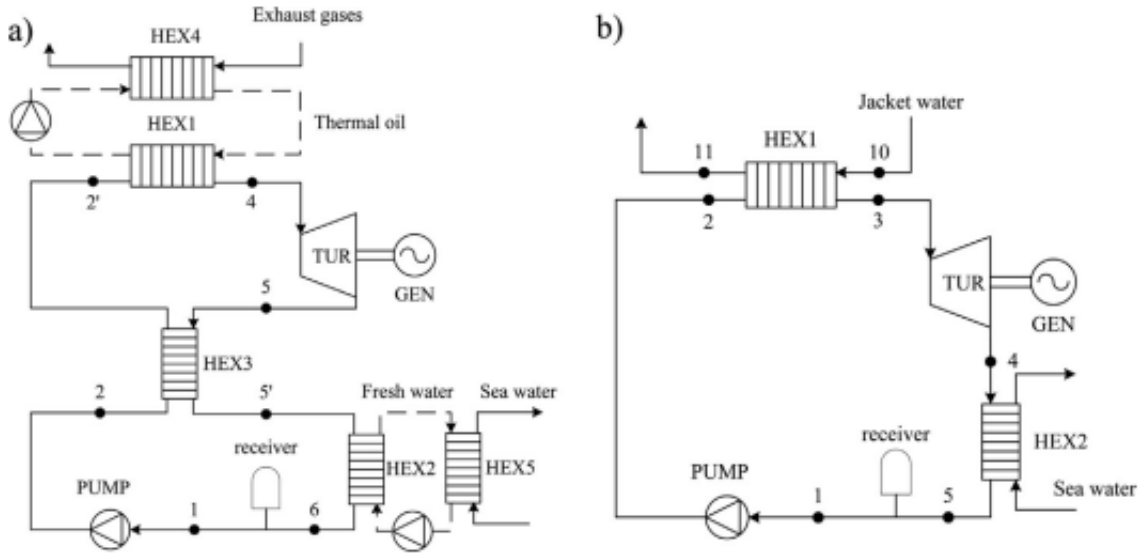
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των ερευνών που σχετίζονται με τα ORC συστήματα σε θαλάσσιες εφαρμογές.

Σκοπός είναι να προσδιοριστεί η καταλληλότερη αρχιτεκτονική κύκλου, το καταλληλότερο ρευστό και εξοπλισμός (στρόβιλος, εναλλάκτες θερμότητας και αντλίες) ανάλογα με την πηγή θερμότητας. Σε αυτό το μέρος, η οικονομική βιωσημότητα του συστήματος ORC και η εγκατάσταση επί του πλοίου αξιολογούνται επίσης.

8.2.1 Η αρχιτεκτονική του κύκλου ORC

Μπορούν να υπάρξουν διάφορες αρχιτεκτονικές ORC κύκλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Δηλαδή απλή, αναγεννημένη, πολλαπλών επιπέδων πίεσης και κλιμακωτή. Οι πιο κοινές διαμορφώσεις είναι οι απλοί και οι αναγεννημένοι κύκλοι (βλέπε Σχήμα 10). Οι κλιμακωτές μονάδες ORC εγκαθίστανται, μέχρι σήμερα, μόνο σε μεγάλες γεωθερμικές μονάδες.

Ένα βασικό ερώτημα είναι η καταλληλότητα των μονάδων αναγεννημένου ORC για την ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων όταν περιορίζονται στις ελάχιστες θερμοκρασίες λέβητα, συχνά λόγω περιορισμών στην περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Η διαδικασία αναγέννησης βελτιώνει την απόδοση, αυξάνοντας δυνητικά την παραγωγή ισχύος κατά περίπου 10% σε σύγκριση με απλούστερες διαμορφώσεις. Για τη μεταφορά θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας στο οργανικό ρευστό με παράλληλη ελαχιστοποίηση της υποβάθμισης του ρευστού κατά την εκκίνηση και τη διακοπή λειτουργίας, προτείνεται από ορισμένους ερευνητές ένας ενδιάμεσος βρόγχος πετρελαίου (oil loop), ο οποίος προσφέρει όχι μόνο πλεονεκτήματα απόδοσης αλλά και βελτιωμένη δυνατότητα ελέγχου.



Εικόνα 28 **Τυπικές διατάξεις αναγεννημένης (α) και απλής (β) αρχιτεκτονικής ενός ORC κύκλου**

Η ενσωμάτωση των καυσαερίων, του αέρα απορρόφησης (scavenge air) και του νερού (jacket water) στις μονάδες ORC αποτελεί βασικό στόχο. Ο συνδυασμός της θερμότητας των

καυσαερίων και του αέρα απορρόφησης αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ισχύος σε αναγεννημένης διάταξης συστήματα ORC. Προτείνεται η ενσωμάτωση ενός αναγεννητή για την αύξηση της θερμικής απόδοσης της μονάδας ORC με την προθέρμανση του εργαζόμενου ρευστού με τη χρήση του νερού του μανδύα και της θερμότητας του αέρα απορρόφησης.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση διαφορετικών πηγών θερμότητας παρουσιάζει προκλήσεις. Η χρήση ενδιάμεσων βρόχων φαίνεται να αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και μειώνει τη θερμική απόδοση λόγω της αυξημένης μη αναστρεψιμότητας της μεταφοράς θερμότητας. Η προσεκτική εξέταση των χαρακτηριστικών εκτός σχεδιασμού είναι ζωτικής σημασίας κατά την ενσωμάτωση του αέρα απορρόφησης με άλλες πηγές θερμότητας, για την αποφυγή παρατεταμένων διακοπών λειτουργίας κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων της ενέργειας του αέρα απορρόφησης. Οι οικονομικές εκτιμήσεις συνηγορούν σε μεγάλο βαθμό υπέρ των απλών αρχιτεκτονικών κύκλων χωρίς ενδιάμεσους βρόχους, ιδίως για την ικανοποίηση της απαίτησης για σύντομες περιόδους απόσβεσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Εν κατακλείδι, η βελτιστοποίηση της ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας σε ναυτιλιακές εφαρμογές μέσω μονάδων ORC είναι ένα πολύπλευρο εγχείρημα. Η επιλογή μεταξύ απλών και αναγεννημένων διαμορφώσεων, η ενσωμάτωση διαφόρων πηγών θερμότητας και η οικονομική βιωσιμότητα διαφορετικών αρχιτεκτονικών παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό βιώσιμων και αποδοτικών συστημάτων ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων για τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Επίσης, εξετάζονται εναλλακτικά υγρά ψύξης, αν και το θαλασσινό νερό παραμένει η προτιμότερη επιλογή στις περισσότερες περιπτώσεις. Για την ανάκτηση θερμότητας από το νερό του μανδύα, προτείνονται τόσο απλά όσο και αναγεννημένα συστήματα ισχύος ORC, με μελέτες βελτιστοποίησης που αναδεικνύουν τις δυνατότητες της ψύξης με θαλασσινό νερό χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσου βρόχου.

8.3 Υπολογισμός όξινου σημείου δρόσου

8.3.1 Προέλευση και ορισμός της ADP

Το θέμα του όξινου σημείου δρόσου προέρχεται από το γεγονός ότι τα καυσαέρια περιέχουν όξινα αέρια όπως SO2, SO3, HF, HBr, NO, NO2 , κ.λπ. Αυτά τα αέρια μπορούν να μετατραπούν σε θειικό οξύ (H2SO4), υδροχλωρικό οξύ, νιτρικό οξύ, και να συμπυκνωθούν περαιτέρω κάτω από συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία στην οποία το όξινο αέριο στα καυσαέρια αρχίζει να συμπυκνώνεται ονομάζεται ADP. Η πρόβλεψη της ADP έχει απασχολήσει για ένα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μεταξύ αυτών των όξινων αερίων, η συγκέντρωση των οξειδίων του θείου είναι σημαντικά υψηλότερη από τα υπόλοιπα. Ως εκ τούτου, το H2SO4 θεωρείται ότι κυριαρχεί στη συμπεριφορά συμπύκνωσης οξέων σε flue gas. Το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης βιβλιογραφίας σχετικά με το ADP σχετίζεται με

συμπύκνωση H2SO4. Ως εκ τούτου, το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται επίσης κυρίως στο θέμα της συμπύκνωσης H2SO4.

Δεδομένου ότι το γi, αντιπροσωπεύει τον ποσοστιαίο συντελεστή μάζας για κάθε ουσία ενός συγκεκριμένου καυσίμου, η παραγωγή καυσαερίων [kg αερίων/kg καύσιμο] για τέλεια (στοιχειομετρική) καύση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mu_i = \sum_{\kappa} \mu_{i,\kappa} \cdot \gamma_{\kappa}$$

Όπου τα αντίστοιχα $\mu_{i,k}$ δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

	μ_{CO2}	μ_{H2O}	μ_{SO2}	μ_{N2}	μ_{O2}	μ_{LoT}
C	3.664191	0	0	8.814027	2.664191	11.47822
H	0	8.936683	0	26.25718	7.936683	34.19386
S	0	0	1.997935	3.301501	0.997935	4.299437
N	0	0	0	0.5	0	0
O	0	0	0	3.308332	-1	-4.30833

Εικόνα 29 Συντελεστές εξίσωσης

Η μόνη διαφορά εμφανίζεται για το H_2O, όπου η συνολική μάζα ανά kg καυσίμου είναι στην πραγματικότητα ένα προϊόν, όχι μόνο του Η του καυσίμου αλλά και της υγρασίας του αέρα.

Ο τελικός λόγος μάζας είναι ίσος με:

$$\mu_{H_20,t} = \mu_{(H_2O),B} + x_{(H_2O),L} \cdot \sum_{k} \mu_{LoT,k} \cdot \gamma_{\kappa}$$

Όπου:

$xH2O,L$, αντιστοιχεί στην υγρασία του αέρα [kg H2O/ kg αέρα]. Σύμφωνα με το νόμο του Dalton η μερική πίεση κάθε ουσίας στη ροή των καυσαερίων, μπορεί να υπολογιστεί όπως φαίνεται παρακάτω:

$$p_i = y_i \cdot p$$

Όπου:

- yi, είναι η ογκομετρική συγκέντρωση κάθε ουσίας (i), στο καυσαέριο
- p, είναι η πίεση των καυσαερίων

Ο συντελεστής Ri για κάθε ουσία μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R_i = \left(\frac{\overline{R}}{MB_i}\right)\left[\frac{J}{kgK}\right]$$

Όπου:

- $\overline{R} = 8.314\, J/molK$
- Μοριακό βάρος σε kg/kmol

Για τα καυσαέρια ο συντελεστής R μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R_{gas} = \sum x_i \cdot R_i$$

όπου xi είναι το κλάσμα μάζας των καυσαερίων, το οποίο υπολογίζεται ως εξής :

$$x_i = \frac{\mu_i}{\mu_g}$$

και μ_g είναι η συνολική παραγωγή μάζας καυσαερίων ανά kg καυσίμου.

$$\mu_g = \lambda \cdot \left(1 + x_{H_2O,L}\right) \cdot \sum_k \mu_{LoT,k} \cdot \gamma_k + 1$$

Η ογκομετρική συγκέντρωση κάθε ουσίας είναι ίση με:

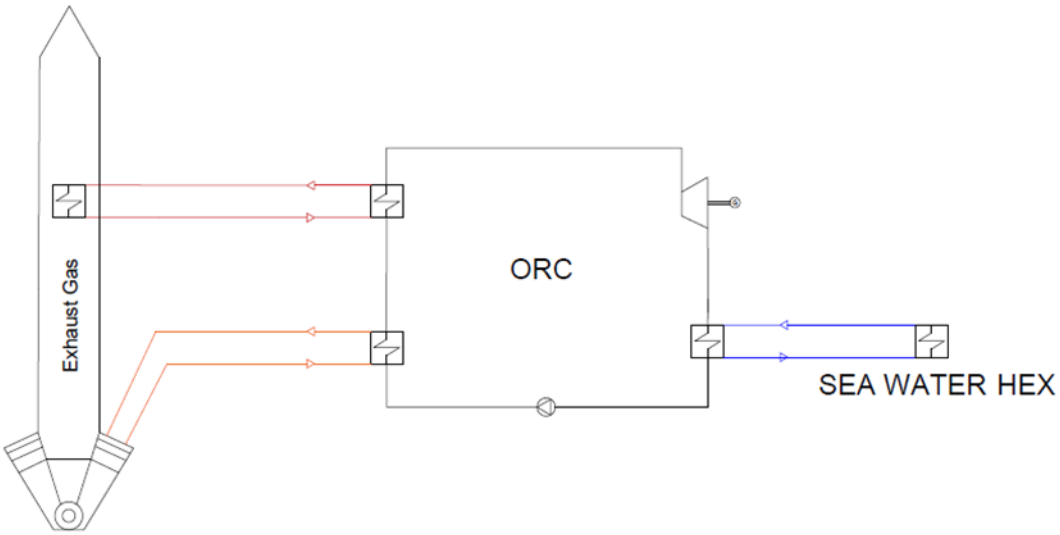
$$y_i = x_i \cdot \left(\frac{R_i}{R_{gas}}\right)$$

Η θερμοκρασία όξινου σημείου δρόσου μπορεί να υπολογιστεί με τον εμπειρικό τύπο που παρέχεται από τους Verhoff & Banchero:

$$T = \frac{1000}{2.276 - 0.0294ln(p|H2O) - 0.0858ln(p_{SO2}) + 0.0062ln(p_{H2O}) \cdot ln(p_{SO3})}$$

9 Μοντελοποίηση συστήματος ORC

Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει την πρακτική επίπτωση του οργανικού κύκλου Rankine (ORC) στο πλαίσιο της ενεργειακής αποδοτικότητας στη ναυτιλία. Η ορθή διαστασιολόγηση και μοντελοποίηση της τεχνολογίας ORC, ανάλογα με την κάθε εφαρμογή, είναι απαραίτητη για την εκτίμηση του δυναμικού μείωσης τόσο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όσο και της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, το μοντέλο του συστήματος ORC που χρησιμοποιείται αφορά εμπορική διάταξη ονομαστικής ισχύος 200 kWel, ο χάρτης λειτουργίας του οποίου έχει προκύψει πειραματικά, με μεταβλητές συνθήκες εισόδου. Το παρόν σύστημα ORC, εκμεταλλεύεται την απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων από τις κύριες μηχανές του πλοίου, με χρήση ενδιάμεσου κυκλώματος νερού – προπυλενογλυκόλης, το οποίο τροφοδοτεί τον εξατμιστή του. Παράλληλα, εκμετάλλευση απορριπτόμενης θερμότητας πραγματοποιείται και από το κύκλωμα ψύξης των κύριων μηχανών του πλοίου, η οποία χρησιμοποιείται στο τμήμα του προθερμαντή της μονάδας. Για τη συμπύκνωση του εργαζόμενου μέσου, γίνεται χρήση του νερού ψύξης χαμηλής θερμοκρασίας του πλοίου, η θερμοκρασία του οποίου εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού. Στο παρακάτω γράφημα πραγματοποιείται απεικόνιση της διάταξης της μονάδας ORC.



Εικόνα 30 Μοντέλο συστήματος ORC

Η μαθηματική μοντελοποίηση της μονάδας ORC, βασίζεται σε τρεις βασικές μεταβλητές:

- Θερμοκρασία εισερχομένου νερού εξατμιστή (T_HW)
- Θερμοκρασία εισερχομένου νερού προθερμαντή (T_WW)
- Θερμοκρασία εισερχομένου νερού συμπυκνωτή (T_SW)

Για λόγους πληρότητας παρακάτω παρατίθεται το μαθηματικό μοντέλο.

$$P_{el,net} = \sum_{i=1}^{6} a_{SW1,i} \cdot (T_{SW} + k) + a_{HW1,i} \cdot T_{HW} + a_{WW1,i}$$
$$\cdot T_{WW} \sum_{j=1}^{5} a_{HW2,i,j} \cdot (T_{SW} + k)^j \cdot (T_{HW})^i + a_{WW2,i,j} \cdot (T_{SW} + k)^j \cdot (T_{WW})^i$$
$$+ a_{HWW,i,j} \cdot (T_{HW})^j \cdot (T_{WW})^i$$

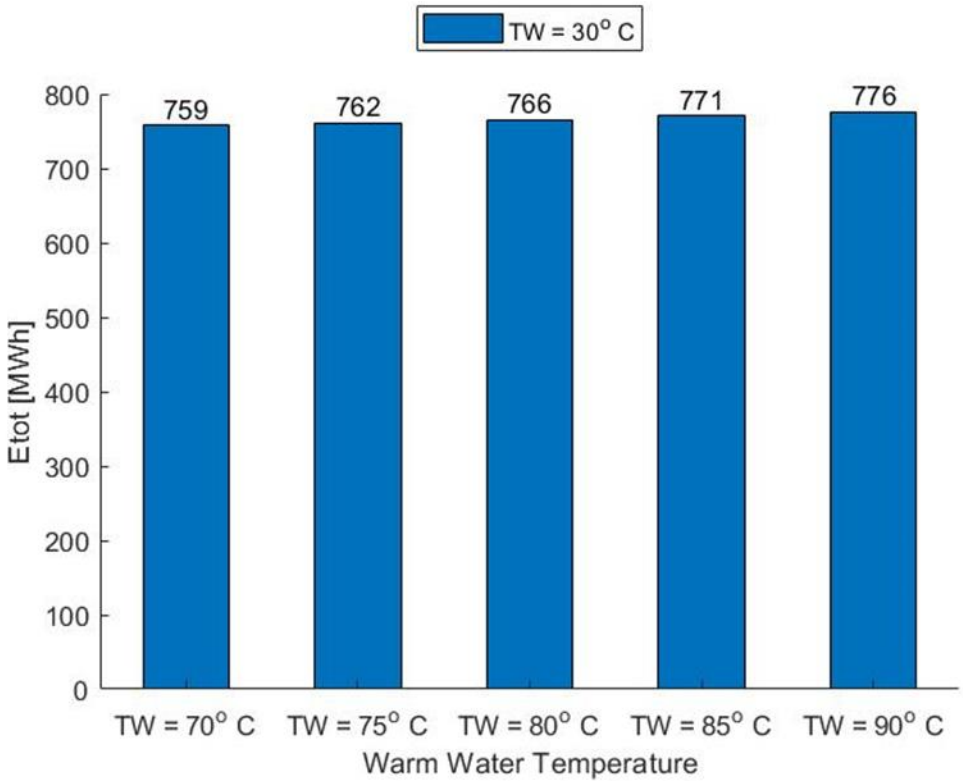
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες προσαγωγής νερού (ή νερού – προπυλενογλυκόλης) στον εξατμιστή, προθερμαντή και συμπυκνωτή της μονάδας.

	Θερμοκρασία εισόδου	
Σύστημα	Ελάχιστη (°C)	Μέγιστη (°C)
Εξατμιστής	105,0	145,0
Προθερμαντής	50,0	110,0
Συμπυκνωτής	5,0	35,0

Από τα δεδομένα φορτίου του πλοίου καθώς και θερμοκρασιών απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων, και με χρήση κατάλληλης θερμοκρασιακής αναγωγής στο κύκλωμα τροφοδοσίας του εξατμιστή της μονάδας, υπολογίζεται η παραγόμενη καθαρή ηλεκτρική ενέργεια.

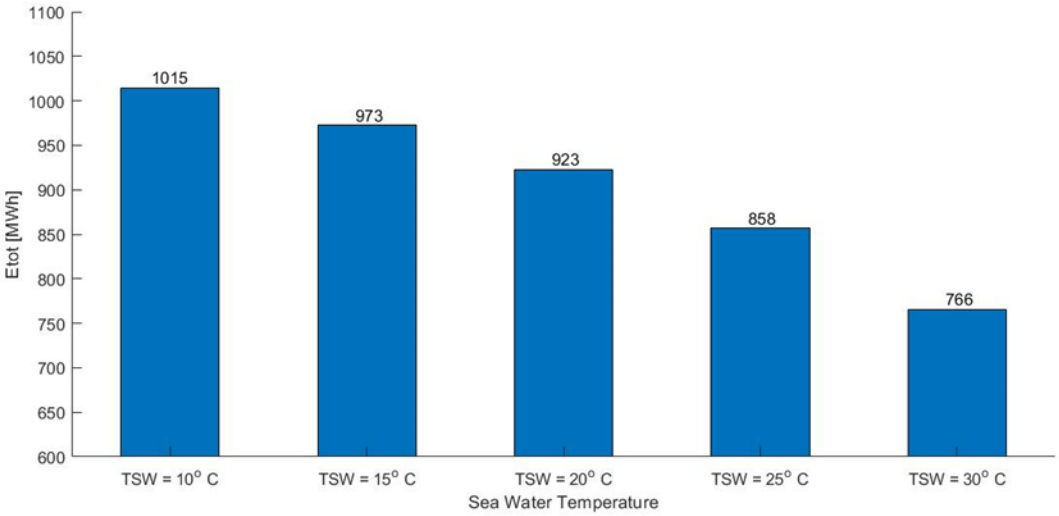
Δεδομένου πως στοιχεία τόσο για την θερμοκρασία του νερού του κυκλώματος ψύξης των μηχανών του πλοίου, όσο και για την θερμοκρασία του θαλασσινού νερού δεν είναι διαθέσιμα, η εξέταση του δυναμικού της τεχνολογίας ORC, εξετάζεται μέσω ανάλυσης ευαισθησίας.

Συγκεκριμένα, διατηρώντας τη θερμοκρασία τροφοδοσίας του νερού συμπύκνωσης σταθερή και ίση με 30°C, και μεταβάλλοντας την θερμοκρασία του νερού προσαγωγής στον προθερμαντή της μονάδας στο εύρος των 70 – 90°C (που αποτελεί τυπικό εύρος ρύθμισης του νερού ψύξης των χιτωνίων της ΚΜ), προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.



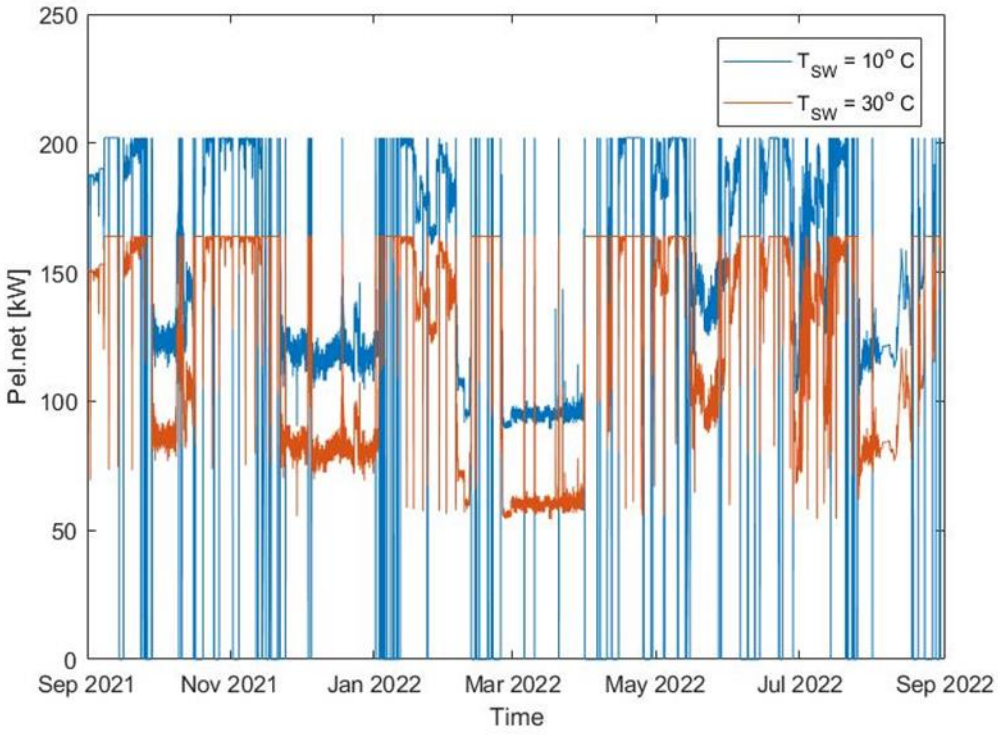
Εικόνα 31 Σχέση παραγόμενης ενέργειας με την θερμοκρασία τροφοδοσίας

Κατά την ανάλυση των παραπάνω, διαπιστώνεται ότι η θερμοκρασία τροφοδοσίας του νερού προθέρμανσης επιδρά ελάχιστα στη συνολική παραγόμενη ενέργεια, αφού μια αύξηση της τάξης των 20°C προκαλεί μόλις 2,2% επιπλέον παραγωγής. Αντίθετα, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία συμπύκνωσης στο εύρος των 10°C έως 30°C, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία προσαγωγής του νερού προθέρμανσης στους 80°C, παρατηρείται σημαντική αύξηση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, που φτάνει έως και 32,5%.



Εικόνα 32 Σχέση παραγόμενης ενέργειας σε σταθερή θερμοκρασία νερού (80°C)

Η παραπάνω αύξηση γίνεται εμφανής παρατηρώντας και την επιμέρους παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στα διάφορα φορτία του πλοίου.



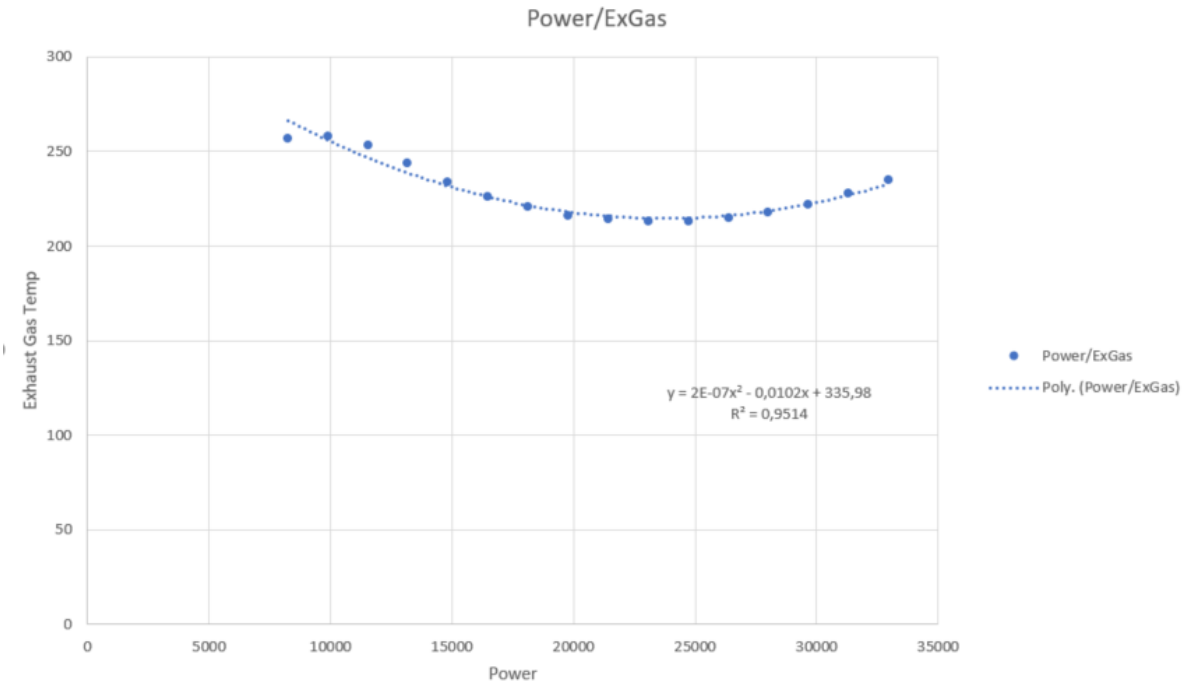
Εικόνα 33 Διάγραμμα σχέσης ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα φορτία

10 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου ORC στα δεδομένα του πλοίου. Η ανάλυση επικεντρώνεται αρχικά στην εκτίμηση του δυναμικού απορριπτόμενης θερμότητας και έπειτα στην αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος ORC, σε σχέση με την ενεργειακή εκμετάλλευση των καυσαερίων και την εξοικονόμηση καυσίμου, συγκρίνοντας τα υπολογιστικά αποτελέσματα με τα πραγματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από το πλοίο. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος και τη διατύπωση συμπερασμάτων σχετικά με την πιθανή εφαρμογή του στη ναυτιλία.

10.1 Ενεργειακή Ανάλυση

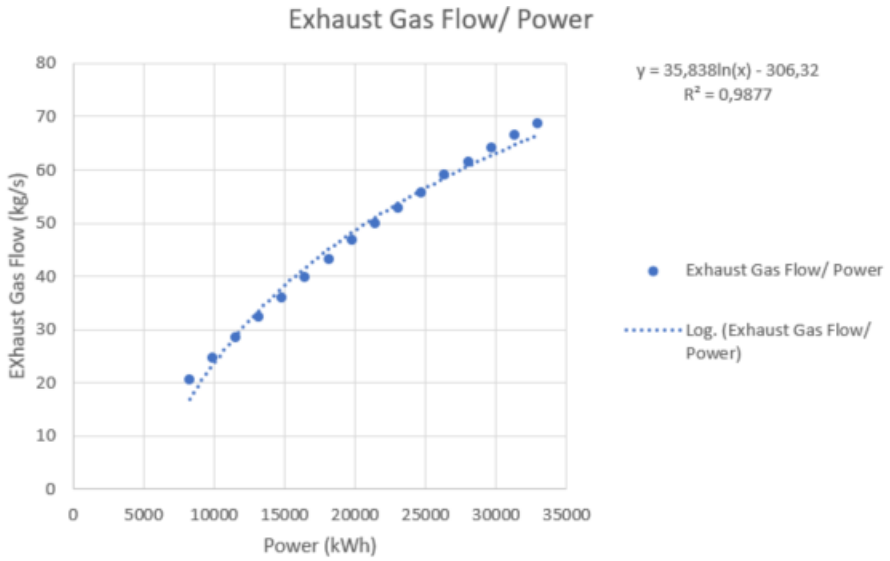
Όλες οι έρευνες βασίζονται σε επιχειρησιακά δεδομένα από βάσεις δεδομένων, συγκεκριμένα για την περίπτωσή μας επιλέχθηκε ο κινητήρας της MAN 7G80ME-C10.5-HPSCR. Ο οποίος έχει την παρακάτω σχέση μεταξύ της ισχύος της κύριας μηχανής και της θερμοκρασίας των καυσαερίων.



Εικόνα 34 Διάγραμμα ισχύος Κ/Μ σε σχέση με την θερμοκρασία των καυσαερίων

Στο πλαίσιο της ενσωμάτωσης συστημάτων (ORC) σε δεξαμενόπλοια, η κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ισχύς του κινητήρα και της ροής καυσαερίου είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας. Το διάγραμμα (Εικόνα 35) απεικονίζει αυτή τη σχέση, τονίζοντας πώς οι μεταβολές στην ισχύ του κινητήρα επηρεάζουν τη ροή καυσαερίων. Καθώς αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα, η ποσότητα

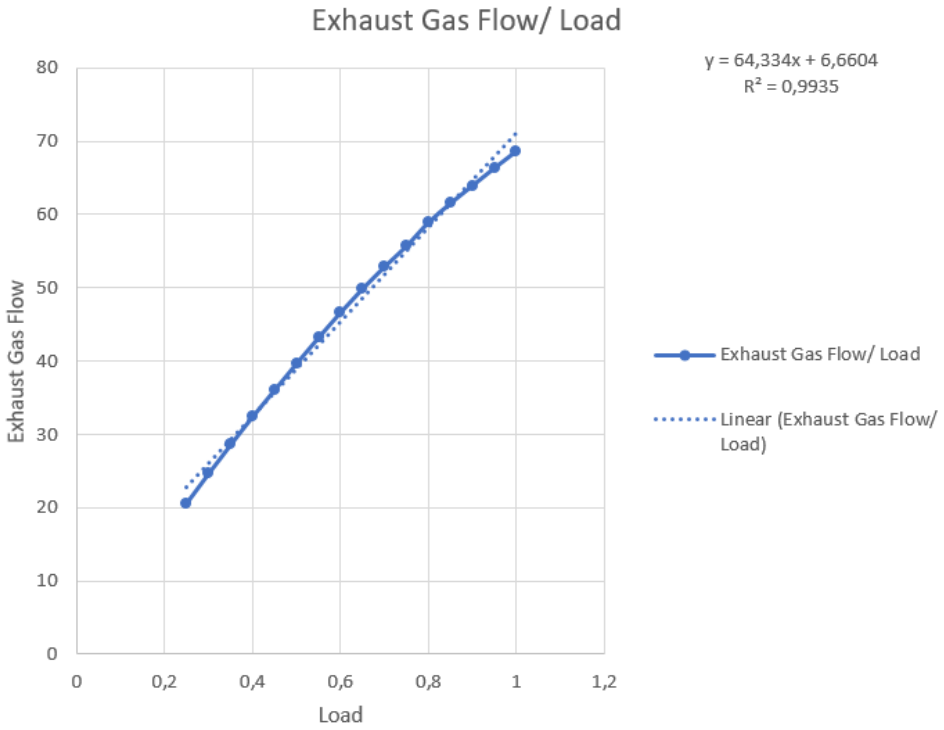
καυσίμου που καίγεται ανά μονάδα χρόνου αυξάνεται, οδηγώντας σε αντίστοιχη αύξηση της παραγωγής καυσαερίων.



Εικόνα 35 Διάγραμμα παροχής καυσαερίων σε σχέση με την ισχύ της Κ/Μ

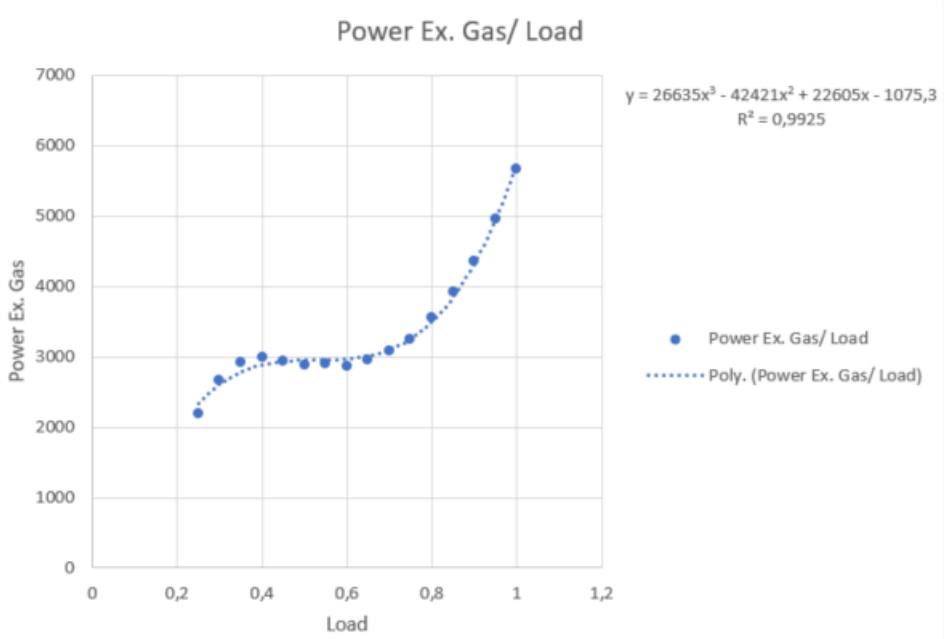
Αυτός ο τύπος βοηθά στην πρόβλεψη του ρυθμού ροής καυσαερίων για διαφορετικές τιμές της ισχύος κινητήρα, ο οποίος είναι απαραίτητος για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του συστήματος ORC, για τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης.

Το διάγραμμα (Εικόνα 36) απεικονίζει τη σχέση μεταξύ της παροχής καυσαερίων και του φορτίου της μηχανής. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του φορτίου της μηχανής, η παροχή καυσαερίων αυξάνεται γραμμικά. Αυτή η άμεση σχέση υποδεικνύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που απαιτείται από τη μηχανή, τόσο περισσότερα καυσαέρια παράγονται.



Εικόνα 36 Διάγραμμα παροχής καυσαερίων σε σχέση με το φορτίο της Κ/Μ

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 37) απεικονίζεται η σχέση μεταξύ του δυναμικού εκμετάλλευσης καυσαερίων και του φορτίου της μηχανής. Καθώς το φορτίο της μηχανής αυξάνεται, αυξάνεται επίσης η παραγωγή καυσαερίων, γεγονός που αυξάνει το δυναμικό εκμετάλλευσης για την ανάκτηση ενέργειας μέσω του συστήματος ORC. Το διάγραμμα αυτό καταδεικνύει πως οι υψηλότερες τιμές φορτίου μηχανής προσφέρουν μεγαλύτερες ποσότητες καυσαερίων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν πιο αποτελεσματικά για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση καυσίμου.



Εικόνα 37 Διάγραμμα δυναμικού εκμετάλλευσης καυσαερίων σε σχέση με το φορτίο της Κ/Μ

Με βάση τα επιχειρησιακά δεδομένα του εξεταζόμενου πλοίου, η εφαρμογή του μοντέλου συστήματος ORC έχει παράγει τα εξής αποτελέσματα σε όρους εξοικονόμησης καυσίμου:

Η συνολική εξοικονόμιση καυσίμου δίνεται διαιρώντας τις συνολικές MWh προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη επί της απόδοσης του ντιζελοκινητήρα του πλοίου.

Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα :

- Για 766 MWh
- Με κατώτερη θερμογόνο δύναμη 11,83 kWh/kg = MWh/tn
- Για απόδοση κινητήρα 40 %

Πετυχαίνουμε εξοικονόμηση 161 tn καυσίμου ανά έτος.

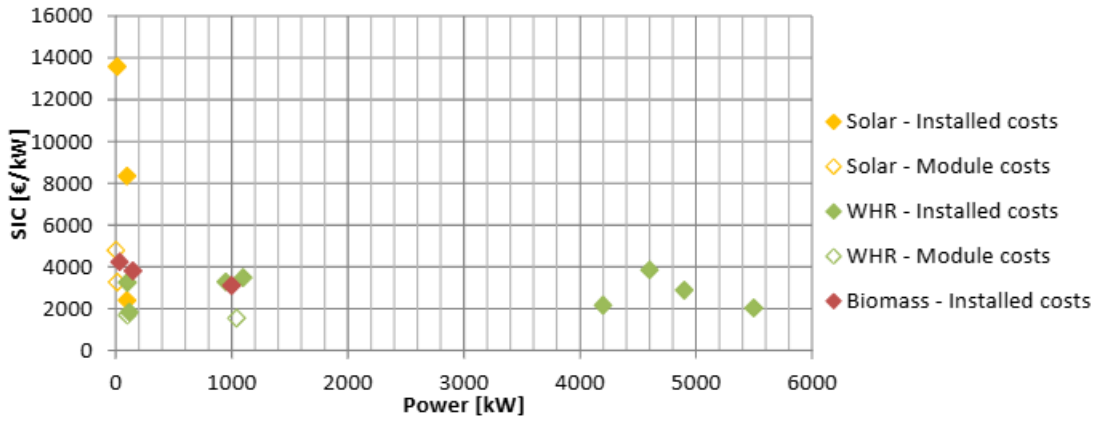
Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της έρευνας, η ανάλυση των διαγραμμάτων που σχετίζουν την παροχή καυσίμου με το φορτίο της κύριας μηχανής και το δυναμικό εκμετάλλευσης των καυσαερίων σε συνάρτηση με το φορτίο, αποκάλυψε σημαντικές σχέσεις που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση του πλοίου. Τα δεδομένα αυτά επέτρεψαν μια λεπτομερή αξιολόγηση της συμπεριφοράς του πλοίου σε διάφορα επίπεδα φόρτισης και ανέδειξαν τις περιοχές όπου μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου μέσω της βελτιστοποίησης της απόδοσης.

Η εφαρμογή αυτών των δεδομένων σε ένα υπάρχον μοντέλο ORC απέδωσε εξαιρετικά ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η χρήση του συστήματος ORC με βάση τα δεδομένα του πλοίου υπολόγισε μια μέση απόδοση της κύριας μηχανής στο 40%, με εκτιμώμενη εξοικονόμηση καυσίμου 161 τόνων ετησίως. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα του ORC να αξιοποιήσει αποτελεσματικά την ενέργεια των καυσαερίων, προσφέροντας ουσιαστική μείωση στην κατανάλωση καυσίμου.

Η επίτευξη αυτών των αποτελεσμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική και καινοτόμος για το μέλλον της ναυτιλίας. Η δυνατότητα εξοικονόμησης καυσίμου σε τόσο μεγάλο βαθμό ανοίγει νέους ορίζοντες για περαιτέρω έρευνες και εφαρμογές στην ενεργειακή διαχείριση των πλοίων. Παράλληλα, η μείωση του κόστους και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης καθιστούν αυτή την τεχνολογία πολύτιμο εργαλείο για τη βιώσιμη ανάπτυξη της ναυτιλιακής βιομηχανίας, προσφέροντας νέες προοπτικές για εξοικονόμηση πόρων και μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

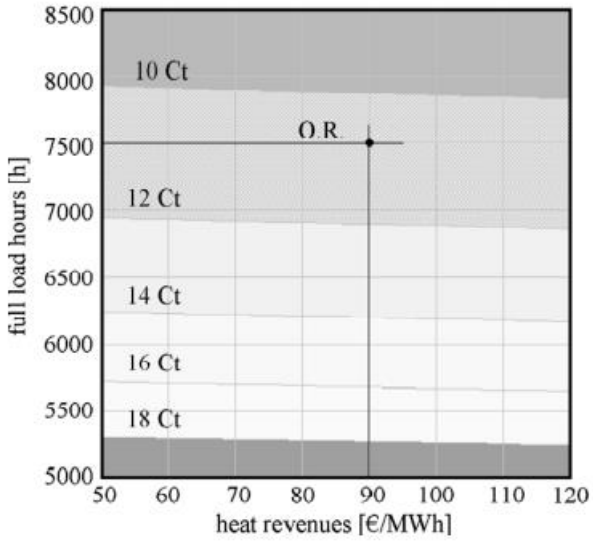
10.2 Κόστος του συστήματος

Η βιβλιογραφία για τα συστήματα και τις εφαρμογές ORC είναι εκτεταμένη. Η σημασία της οικονομικής προοπτικής αναγνωρίζεται και λαμβάνεται όλο και περισσότερο υπόψη στις μελέτες μηχανικής. Στη βάση της οικονομικής ανάλυσης είναι οι κεφαλαιουχικές δαπάνες, ιδιαίτερα σημαντικές για τα έργα ORC, καθώς τα ετήσια έξοδα είναι αρκετά χαμηλά. Το σχήμα δείχνει το συγκεκριμένο κόστος επένδυσης (SIC) που εκτιμάται για διάφορους τύπους συστημάτων ORC: ηλιακή ενέργεια, ανάκτηση αποβλήτων θερμότητας (WHR) και βιομάζα.



Τα αποτελέσματα μιας οικονομικής ανάλυσης (A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff, 2009) σχετικά με την ίδια μονάδα μικρο-CHP με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 5kW και αποδοτικότητα 8% παρουσιάζονται στην καμπύλη οικονομικής απόδοσης στο παρακάτω σχήμα. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την τιμή παραγωγής ηλεκτρικής

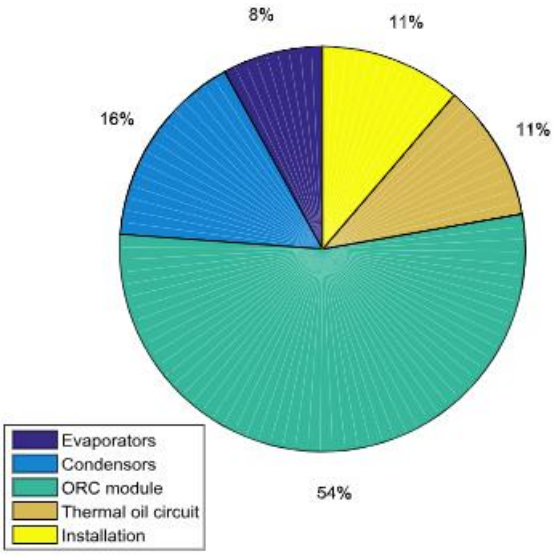
ενέργειας με βάση την τιμή θέρμανσης και τις ώρες λειτουργίας. Σε αυτό το σχήμα, η κατακόρυφη γραμμή απεικονίζει τις ώρες λειτουργίας, ενώ οι οριζόντιες γραμμές δείχνουν τις τιμές θερμότητας. (Η τιμή θέρμανσης / έσοδα δείχνει την τιμή της θερμότητας, δεδομένου ότι αυτό το σύστημα καταναλώνει θερμότητα και κάποια ποσότητα της απόβλητης θερμότητάς του (συνήθως 10%) χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης, αυτός ο αριθμός επηρεάζει το συνολικό έσοδό του). Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται εμφανίζεται σε Ct (1Ct ισούται με 0,01 €/KWh). Η χρήση του συστήματος για περίπου 7500 ώρες θα αποφέρει περίπου 0,105€/KWh για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ η τυπική τιμή θέρμανσης υποτίθεται ότι είναι 0,09€/kWh.



Εικόνα 38 Απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της χρονικής διάρκειας της λειτουργίας σε πλήρες φορτίο με το κέρδος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Για να προσεγγίσει την εκτίμηση του κόστους για τα συστήματα ORC, η παρούσα παράγραφος συγκρίνει το κόστος μιας πραγματικής μελέτης περιπτώσεων με τα έξοδα που λαμβάνονται από μια ακατέργαστη εκτίμηση. Η μελέτη περίπτωσης αφορά εγκατάσταση ORC ανάκτησης αποβλήτων θερμότητας. Η πηγή θερμότητας είναι καυσαέρια χαμηλής-μεσαίας θερμοκρασίας (150 – 250°C) από μια βιομηχανική μονάδα. Το σύστημα ORC ενσωματώθηκε στο εργοστάσιο χρησιμοποιώντας ένα ενδιάμεσο κύκλωμα θερμικού υγρού, συμπεριλαμβανομένου ενός εναλλάκτη θερμότητας αερίου.Το ίδιο το ORC έχει ισχύ 375 kW και αποτελείται από μια φυγοκεντρική αντλία, έναν ακτινικό επεκτατή ενός βήματος και μια γεννήτρια. Ο εξατμιστής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας πλάκας και η συμπύκνωση συμβαίνει με ψύξη αέρα. Το έργο έχει SIC 4216 €/kW ακαθάριστο, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης. Η διαίρεση των δαπανών για αυτό το έργο (Εικόνα 38) δείχνει, πως ένα σημαντικό μερίδιο προέρχεται από την ίδια την μονάδα ORC, συμπεριλαμβανομένης της αντλίας, του επεκτατή και της γεννήτριας. Το ενδιάμεσο

κύκλωμα θερμικού πετρελαίου αντιπροσωπεύει περίπου το 11% των συνολικών επενδυτικών δαπανών.



Εικόνα 39 Η κατανομή του κόστους μίας εγκατάστασης ORC

10.3 Συνολική Οικονομική Ανάλυση

Η τελική εκτίμηση κόστους για την εγκατάσταση, αγορά και συντήρηση ενός συστήματος ORC (Organic Rankine Cycle) με ονομαστική ισχύ 200 kW στο υπό εξέταση πλοίο, το οποίο έχει μήκος 340 μέτρα και πλέει με ονομαστική ταχύτητα 15,5 κόμβους, βασίζεται στα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο ORC που εφαρμόστηκε. Συγκεκριμένα, με βάση την εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενέργειας από τα καυσαέρια της κύριας μηχανής, υπολογίστηκε ότι το πλοίο θα εξοικονομεί ετησίως 161 τόνους καυσίμου. Αυτή η εξοικονόμηση προκύπτει από τη διαίρεση των συνολικών MWh που θα παραχθούν από το σύστημα (766 MWh), δια της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του καυσίμου (11,83 kWh/kg) και της απόδοσης του ντιζελοκινητήρα του πλοίου, που ενδεικτικά λήφθηκε στο 40%. Στον παρακάτω Πίνακα φαίνονται και οι διάφορες τιμές ετήσιας εξοικονόμησης καυσίμου για άλλες τιμές απόδοσης του DG. Με την τιμή καυσίμου HFO, η οποία χρησιμοποιείται για την πρόωση των πλοίων, να έχει διαμορφωθεί σε μέση τιμή 420 ευρώ ανά τόνο βάσει πενταετούς ανάλυσης, η ετήσια οικονομική εξοικονόμηση ανέρχεται σε 67.620 ευρώ. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα συνολικά κόστη και η περίοδος αποπληρωμής για διάφορες τιμές του HFO.

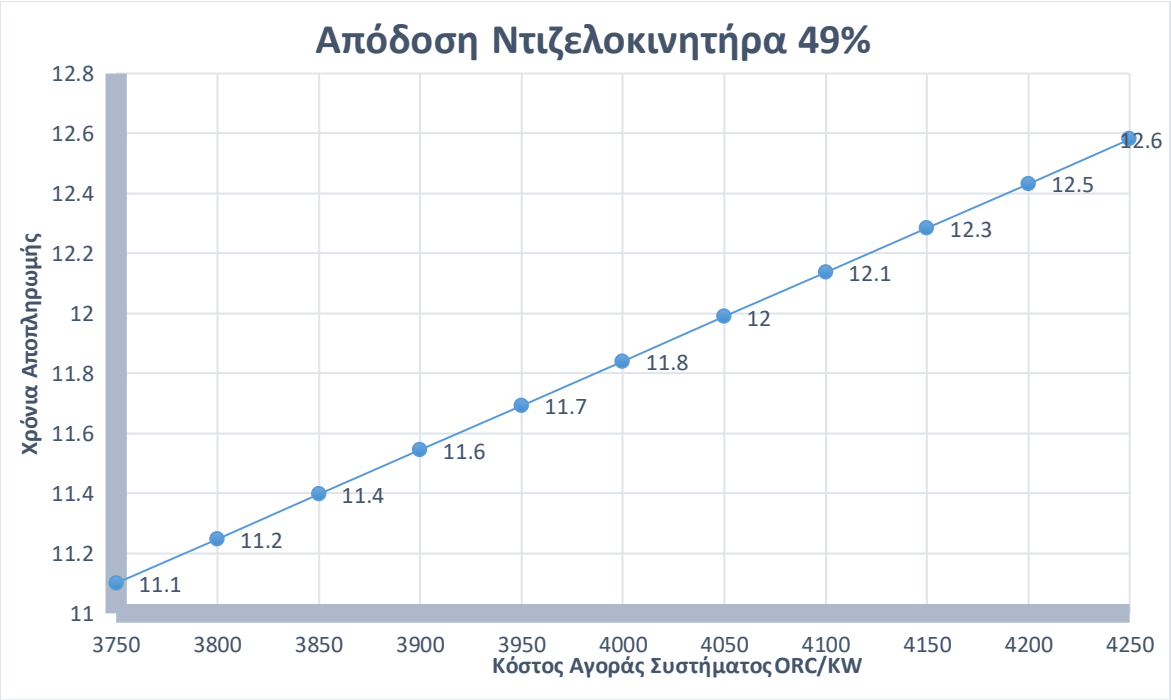
Το συνολικό κόστος για την αγορά, εγκατάσταση και συντήρηση του συστήματος ORC με ονομαστική ισχύ 200 kW υπολογίστηκε σε 4216 ευρώ ανά kW, γεγονός που σημαίνει ότι για την περίπτωση του συγκεκριμένου πλοίου το συνολικό κόστος ανέρχεται στα 843.200 ευρώ. Με την ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου να ανέρχεται σε 67.620 ευρώ, εκτιμάται ότι

η απόσβεση της επένδυσης θα πραγματοποιηθεί σε περίπου 12 χρόνια. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται αποκλειστικά στην εξοικονόμηση καυσίμου και δεν λαμβάνει υπόψη άλλα

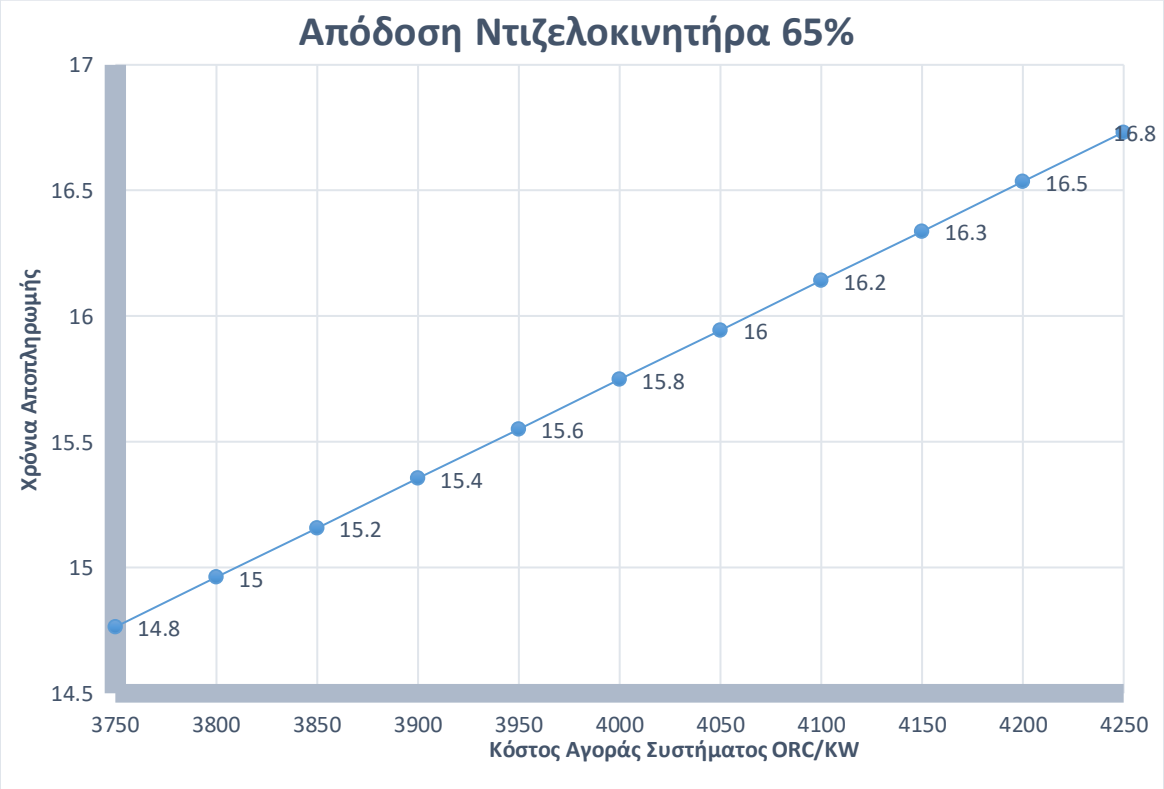
οφέλη, όπως η μείωση των εκπομπών ρύπων και τα πιθανά πρόσθετα οικονομικά οφέλη από την συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

Απόδοση ντιζελοκινητήρα	**Ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου σε τόνους**	**Ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου σε ευρώ με ανεφοδιασμό απο το Rotterdam**	**Ετήσια εξοικονόμηση καυσίμου σε ευρώ με ανεφοδιασμό απο το Singapore**
45%	144	67.392	79.056
49%	133	62.111	73.017
53%	123	57.441	67.527
57%	114	53.238	62.586
61%	107	49.969	58.743
65%	100	46.700	54.900

Πέρα από την άμεση οικονομική εξοικονόμηση, τα πολλαπλά οφέλη αυτής της επένδυσης είναι σημαντικά και καινοτόμα για τον ναυτιλιακό τομέα. Η εγκατάσταση ενός συστήματος ORC συμβάλλει στη συμμόρφωση με τους σύγχρονους κανονισμούς σχετικά με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αποφεύγοντας έτσι ενδεχόμενα πρόστιμα και διατηρώντας το πλοίο φιλικότερο προς το περιβάλλον. Επιπλέον, η επιτυχία αυτής της έρευνας ανοίγει νέες προοπτικές για την εφαρμογή του συστήματος και σε άλλα πλοία του στόλου, ενισχύοντας τη στρατηγική βιωσιμότητας και μειώνοντας το λειτουργικό κόστος σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η εφαρμογή του συστήματος ORC μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μελλοντικές επενδύσεις που θα εξασφαλίσουν μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα και σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



Εικόνα 40 Σχέση κόστους αγοράς με περίοδο αποπληρωμής με σταθερή απόδοση κινητήρα 49%



Εικόνα 41 Σχέση κόστους αγοράς με περίοδο αποπληρωμής με σταθερή απόδοση 65%

Παραπάνω παρουσιάζονται δύο διαγράμματα που αντικατοπτρίζουν τη σχέση μεταξύ του κόστους αγοράς, επισκευής και συντήρησης ενός Συστήματος ORC/KW και του χρόνου απόσβεσης της επένδυσης για απόδοση ντιζελοκινητήρα 49% και 65% αντίστοιχα.

Στον οριζόντιο άξονα (X) του διαγράμματος απεικονίζεται το κόστος αγοράς του συστήματος ORC ανά KW, ενώ στον κάθετο άξονα (Y) απεικονίζεται ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης (σε χρόνια). Το διάγραμμα παρουσιάζει συνήθως μια θετική σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών.

10.3.1 Σχέση Κόστους και Χρόνου Απόσβεσης

Όσο αυξάνεται το κόστος αγοράς του συστήματος ORC/KW, τόσο αυξάνεται και ο χρόνος απόσβεσης. Αυτό σημαίνει ότι συστήματα με υψηλότερο κόστος απαιτούν περισσότερα χρόνια για να αποσβεσθεί η επένδυση μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας και του μειωμένου κόστους λειτουργίας που προσφέρουν. Στην πράξη, το κόστος αγοράς περιλαμβάνει τον εξοπλισμό, την εγκατάσταση και πιθανές τροποποιήσεις στο πλοίο για την υποστήριξη του συστήματος ORC.

10.3.2 Διακυμάνσεις και Σημεία Σημασίας

Στο αρχικό μέρος του διαγράμματος, για χαμηλότερες τιμές κόστους αγοράς, ο χρόνος απόσβεσης είναι σχετικά μικρός. Αυτό υποδηλώνει ότι τα πλοία που επενδύουν σε οικονομικά συστήματα ORC θα δουν ταχύτερη απόδοση της επένδυσης.

Ωστόσο, καθώς το κόστος αγοράς αυξάνεται, ο ρυθμός αύξησης του χρόνου απόσβεσης μπορεί να επιβραδυνθεί ή να σταθεροποιηθεί. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην τεχνολογική πρόοδο, καθώς τα πιο ακριβά συστήματα μπορεί να είναι πιο αποδοτικά ενεργειακά, μειώνοντας το χρόνο απόσβεσης.

11 Συμπεράσματα

11.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Καθώς ολοκληρώνουμε αυτή τη διερεύνηση των συστημάτων ORC και των εφαρμογών τους στα πλοία, είναι προφανές ότι παραμένουν σημαντικές δυνατότητες για μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτό. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εμβαθύνουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων ORC και την ενσωμάτωση με διάφορα ενεργειακά συστήματα του πλοίου για την περαιτέρω αύξηση της εξοικονόμησης καυσίμων και τη μείωση των εκπομπών. Επιπλέον, οι πρακτικές εφαρμογές στα πλοία αποτελούν ανεκτίμητη ευκαιρία για τη συλλογή και ανάλυση επιχειρησιακών δεδομένων. Μια τέτοια έρευνα με βάση τα δεδομένα θα μπορούσε να εντοπίσει τις τάσεις απόδοσης στον πραγματικό κόσμο, τις λειτουργικές προκλήσεις και τις ανάγκες συντήρησης, οδηγώντας σε πιο ισχυρές και προσαρμοστικές λύσεις ORC. Με την αξιοποίηση προηγμένης ανάλυσης δεδομένων, μηχανικής μάθησης και στρατηγικών προληπτικής συντήρησης, η ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να ξεκλειδώσει νέες αποδοτικότητες και καινοτομίες, προωθώντας την τεχνολογία ORC προς ευρύτερη και αποτελεσματικότερη εφαρμογή.

12 Αναφορές

[1] Kaymacor, «Story of ORC,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.kaymacor.com/rankine-cycle. [Πρόσβαση 2024].

[2] M. Astolfi, Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems, Woodhead Publishing, 2016.

[3] A. Pesyridis, M. Suleman Asif, S. Mehranfar, A. Mahmoudzadeh Andwari, A. Gharehghani και T. Megaritis, «Design of the Organic Rankine Cycle for High-Efficiency Diesel Engines in Marine Applications,» *Energies,* 2023.

[4] Verdict, «Alfa Laval Unveils ORC Waste Heat Recovery System for Ships,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.verdict.co.uk/alfa-laval-unveils-orc-waste-heat-recovery-system-for-ships/?cf-view. [Πρόσβαση 2024].

[5] GCaptain, «Climeon to Launch HeatPower 300 Marine at SMM Hamburg,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://gcaptain.com/climeon-to-launch-heatpower-300-marine-at-smm-hamburg/. [Πρόσβαση 2024].

[6] A. G. Elkafas, «Thermodynamic Analysis and Economic Assessment of Organic Rankine Cycle Integrated with Thermoelectric Generator Onboard Container Ship,» *Processes,* 2024.

[7] Chunwee Ng, I. C. Tam και B. Wetenhall, «Waste Heat Source Profiles for Marine Application of Organic Rankine Cycle,» *J. Mar. Sci. Eng,* 2022.

[8] E. Wang και N. Peng, «A Review on the Preliminary Design of Axial and Radial Turbines for Small-Scale Organic Rankine Cycle,» *Energies,* 2023.

[9] F. Alshammari, M. Usman και A. Pesyridis, «Expanders for Organic Rankine Cycle Technology,» σε *Organic Rankine Cycle Technology for Heat Recovery*, 2018.

[10] J. C. Soldado, A. Pesyridis, P. Sphicas, P. Nikolakopoulos, C. Markides και M. Deligant, «Axial Turbo-Expander Design for Organic Rankine Cycle Waste-Heat Recovery With Comparative Heavy-Duty Diesel Engine Drive-Cycle Performance Assessment,» *Front. Mech. Eng,* 2021.

[11] J.-S. Kim και D.-Y. Kim, «Preliminary Design and Off-Design Analysis of a Radial Outflow Turbine for Organic Rankine Cycles,» *Energies,* 2020.

[12] M. Read, I. Smith, N. Stosic και A. Kovacevic, «Comparison of Organic Rankine Cycle Systems under Varying Conditions Using Turbine and Twin-Screw Expanders,» *Energies,* 2016.

[13] ALFA LAVAL, «Organic Rankine Cycle (ORC),» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.alfalaval.com/industries/energy-and-utilities/sustainablesolutions/sustainable-solutions/energy-efficiency/waste-heat-recovery/orc/.

[14] P. Lu, Z. Liang, X. Luo, Y. Xia, J. Wang, K. Chen και Y. Liang, «Design and Optimization of Organic Rankine Cycle Based on Heat Transfer Enhancement and Novel Heat Exchanger: A Review,» *Energies,* αρ. 16(3), 2023.

[15] J. Bull, J. Buick και J. Radulovic, «Heat Exchanger Sizing for Organic Rankine Cycle,» *Energies,* αρ. 13(14), 2020.

[16] J. Song, P. Loo, J. Teo και C. Markides, «Thermo-Economic Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems for Geothermal Power Generation: A Comparative Study of System Configurations,» *Front. Energy Res.,* 2020.

[17] N. Kannan και D. Vakeesan, «Solar energy for future world - A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* αρ. 62, pp. 1092-1105, 2016.

[18] W. Fan, Z. Han, P. Li και Y. Jia, «Analysis of the thermodynamic performance of the organic Rankine cycle (ORC) based on the characteristic parameters of the working fluid and criterion for working fluid selection,» *Energy Conversion and Management,* τόμ. 211, 2020.

[19] T. Sung, S. Kim και K. C. Kim, «Thermoeconomic analysis of a biogas-fueled micro-gas turbine with a bottoming organic Rankine cycle for a sewage sludge and food waste treatment plant in the Republic of Korea,» *Applied Thermal Engineering,* αρ. 127, 2017.

[20] P. Kolasinski, «The Method of the Working Fluid Selection for Organic Rankine Cycle (ORC) Systems Employing Volumetric Expanders,» *Working Fluid Selection for Organic Rankine Cycle and Other Related Cycles,* 2020.

[21] J. Song, P. Loo, J. Teo και C. Markides, «Thermo-Economic Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) Systems for Geothermal Power Generation: A Comparative Study of System Configurations,» *Sec. Process and Energy Systems Engineering,* 2020.

[22] IEA, «CO2 Emissions in 2022,» IEA, 2023.

[23] UN, «Emissions Gap Report,» UN Environment Programme, 2023.

[24] H. Ritchie, R. Rosado και M. Roser, «Greenhouse gas emissions,» Our World in Data, 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions.

[25] Z. Hausfather και P. Friedlingstein, «CarbonBrief,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available:

https://www.carbonbrief.org/analysis-global-co2-emissions-from-fossil-fuels-hit-record-high-in-2022/.

[26] IEA, «International Shipping,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en.

[27] European Environment Agency, «Is Europe reducing its greenhouse gas emissions?,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.eea.europa.eu/themes/climate/eu-greenhouse-gas-inventory.

[28] International Energy Agency, «Greece 2023 Energy Policy Review,» IEA, 2023.

[29] GlobalData, «Greenhouse Gas Emissions in Greece (2010 - 2021),» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.globaldata.com/data-insights/macroeconomic/greenhouse-gas-emissions-in-greece-2095998/.

[30] N. Olmer, B. Comer, X. Mao και D. Rutherford, «Greenhouse Gas Emissions From Global Shipping, 2013-2015,» *The International Council on Clean Transportation,* pp. 1-38, 2017.

[31] L. Jiang, J. Kronbak και L. Christensen, «The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil.,» *Emission Control Areas and their Impact on Maritime Transport,* αρ. 28, pp. 19-27, 2014.

[32] J. Vidal, «Health risks of shipping pollution have been 'underestimated',» *Environment, Pollution,* 2009.

[33] L. Bo, M. Xi, L. Hongman, C. Deyang και D. Hongbo, «Challenges of decarbonizing global maritime container shipping toward net-zero emissions,» *Ocean Sustainability,* αρ. 2, 2023.

[34] IMO, «Fourth Greenhouse Gas Study 2020,» IMO, 2020.

[35] IEA, «Global energy sector CO2 emissions by sector in the Sustainable Development Scenario, 2019-2070,» 2020.

[36] IMO, «International Maritime Organization - UPSC Notes,» BYJU'S, 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://byjus.com/free-ias-prep/international-maritime-organization/.

[37] GERMAN SHIPOWNERS' ASSOCIATION, «Four pillars for safety, environment, training, working conditions,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.reederverband.de/en/world-shipping/four-pillars-safety-environment-training-working-conditions.

[38] MG Staff, «MARPOL Annex I to VI Explained: A Guide to Pollution Prevention,» Marinersgalaxy, 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://marinersgalaxy.com/marpol-annex-i-to-vi-explained-a-guide-to-pollution-prevention/.

[39] K. Saiful, «Implementation of the MARPOL Convention in Developing Countries,» BRILL, 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://brill.com/view/journals/nord/79/2/article-p303_4.xml.

[40] E. Akyurek και P. Bolat, «Ranking port state control detention remarks: professional Judgement and spatial overview,» *European Transport Research Review volume,* 2021.

[41] RIGHTSHIP, «MARPOL at 50: What has been achieved so far, and what's next for pollution regulation?,» RIGHTSHIP, 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://rightship.com/insights/marpol-50-what-has-been-achieved-so-far-and-whats-next-pollution-regulation.

[42] IMO, «2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS,» IMO, 2023.

[43] LOCKTON, «What the IMO CO2 reduction strategy means for the marine sector,» LOCKTON, 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://global.lockton.com/gb/en/news-insights/what-the-imo-co2-reduction-strategy-means-for-the-marine-sector.

[44] IMO, «UN agency pushes forward on shipping emissions reduction,» IMO, 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/11-MEPC-74-GHG.aspx.

[45] P. Serra και G. Fancello, «Towards the IMO's GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing International Shipping,» *Sustainability,* 2020.

[46] IMO, «IMO ACTION TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM INTERNATIONAL SHIPPING,» IMO, 2023.

[47] IMO, «IMO's work to cut GHG emissions from ships,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx.

[48] H. Lee, J. Lee, G. Roh, S. Lee, C. Choung και H. Kang, «Comparative Life Cycle Assessments and Economic Analyses of Alternative Marine Fuels: Insights for Practical Strategies,» *Sustainability,* αρ. 16(5), 2024.

[49] S. Vakili, F. Ballini, A. Schonborn, A. Crhistodouloi, D. Dalaklis και A. Olcer, «Assessing the macroeconomic and social impacts of slow steaming in shipping: a literature

review on small island developing states and least developed countries,» *Journal of Shipping and Trade,* αρ. 8(2), 2023.

[50] DCN, «CONTAINERSHIP JUST-IN-TIME ARRIVALS CAN LOWER GHG EMISSIONS: REPORT,» Daily Cargo News, 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.thedcn.com.au/news/environment/containership-just-in-time-arrivals-can-lower-ghg-emissions-report/.

[51] International Chamber of Shipping, «International Chamber of Shipping sets out plans for global carbon levy to expedite industry decarbonisation,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ics-shipping.org/press-release/international-chamber-of-shipping-sets-out-plans-for-global-carbon-levy/.

[52] H. Wang, Y. Liu, F. Li και S. Wang, «Sustainable Maritime Transportation Operations with Emission Trading,» *Journal of Marine Science and Engineering,* αρ. 11(9), 2023.

[53] New Climate Institute, «CARBON PRICING OPTIONS FOR INTERNATIONAL MARITIME EMISSIONS,» 2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://newclimate.org/resources/publications/carbon-pricing-options-for-international-maritime-emissions.

[54] A. G. Fotopoulos και D. P. Margaris, «Computational Analysis of Air Lubrication System for Commercial Shipping and Impacts on Fuel Consumption,» *Computation,* αρ. 8(2), 2020.

[55] H. An , H. Pan και P. Yang, «Research Progress of Air Lubrication Drag Reduction Technology for Ships,» *Fluids,* αρ. 7(10), 2022.

[56] B. Comer, C. Chen, D. Stolz και D. Rutherford, «ROTORS AND BUBBLES: ROUTE-BASED ASSESSMENT OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES TO REDUCE SHIP FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS,» The International Council of Clean Transportation, 2019.

[57] M. Schuler, «Lloyd's Register Finds 'Significant' Efficiency Benefits for Newcastlemax Bulk Carrier Design Featuring Rotor Sails,» gCaptain, 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://gcaptain.com/lloyds-register-finds-significant-efficiency-benefits-for-newcastlemax-bulk-carrier-design-featuring-rotor-sails/.

[58] UN Trade & Development, «Review of Maritime Transport 2021,» 2021.

[59] International Chamber of Shipping, «Shipping and World Trade: World Seaborne Trade,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/shipping-and-world-trade-world-seaborne-trade/.

[60] gCaptain, «Growing Number of Ships Using Waste Heat Recovery to Reduce Emissions,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://gcaptain.com/growing-number-

of-ships-using-waste-heat-recovery-to-reduce-emissions/.

[61] Green Voyage 2050, «Waste heat recovery systems,» 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://greenvoyage2050.imo.org/technology/waste-heat-recovery-systems/.

[62] E. Olaniyi και G. Prause, «Investment Analysis of Waste Heat Recovery System,» *Journal of Marine Science and Engineering,* 2020.

[63] A. Gutierrez, «Thermodynamic Analysis of Waste Heat Recovery Systems in Marine Applications,» *Energy Conversion and Management,* αρ. 210, 2020.

[64] T. Smith, «The Potential for Shipping to Contribute to a Zero-Emission Future.,» *Energy Policy,* αρ. 131, pp. 176-186, 2019.

[65] M. Jaurola, A. Hedin, S. Tikkanen και K. Huhtala, «Optimising design and power management in energy-efficient marine vessel power systems: a literature review,» *Journal of Marine Engineering & Technology,* pp. 92-101, 2018.

[66] C. Behrendt, «Conditions of Waste Heat Recovery in Marine Heat Recovery Systems,» *Journal of Machine Construction and Maintenance,* pp. 141-147, 2017.

[67] F. Baldi , F. Ahlgren, T. Nguyen, C. Gabrielli και K. Andersson, «Energy and exergy analysis of a cruiseship,» *Proceedings of ECOS 2015 - the 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems,* 2015.

[68] Alfa Laval, «Exhaust gas economizer,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/boilers/exhaust-gas-economizer/.

[69] Wartsila, «Exhaust treatment and carbon capture,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.wartsila.com/marine/products/exhaust-treatment.

[70] C. Ng, I. C. Tam και D. Wu, «Thermo-Economic Performance of an Organic Rankine Cycle System Recovering Waste Heat Onboard an Offshore Service Vessel,» *J. Mar. Sci. Eng.,* αρ. 8(5), 2020.

[71] C. E. Sprouse III, «Review of Organic Rankine Cycles for Internal Combustion Engine Waste Heat Recovery: Latest Decade in Review,» *Sustainabillity,* αρ. 16, 2024.

[72] John Cockerill, «Heat Recovery Steam Generators,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://johncockerill.com/en/energy/heat-recovery-steam-generators/.

[73] R. Sanchez, D. Perrotti και A. G. Paz Fort, «Looking into the future ten years later: big full containerships and their arrival to south American ports,» *Journal of Shipping and Trade,* αρ. 8(14), 2021.

[74] M. Venegas, N. G. Hernando, A. Zacarias και M. De Vega, «Performance of a Solar Absorption Cooling System Using Nanofluids and a Membrane-Based Microchannel Desorber,» *Appl. Sci.,* αρ. 10(8), 2020.

[75] S. Sahin, Kovaci και Dikmen, «A GEP model for energy and exergy analysis of LiCl–H2O absorption cooling systems,» *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects,* αρ. 43(17), 2021.

[76] StartUs, «Discover 5 Top Energy Startups developing Waste Heat Recovery Solutions,» 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.startus-insights.com/innovators-guide/discover-5-top-energy-startups-developing-waste-heat-recovery-solutions/.

[77] D. Ayou και A. Coronas, «New Developments and Progress in Absorption Chillers for Solar Cooling Applications,» *Applied Sciences,* 2020.

[78] X. Xia, B. Liu, B. Zhao, Z. Xia και S. Li, «Enhanced Water Adsorption of MIL-101(Cr) by Metal-Organic Polyhedral Encapsulation for Adsorption Cooling,» *Nanomaterials,* 2023.

[79] Y. Yin, J. Shao, L. Zhang, Q. Cui και H. Wang, «Experimental Study on Heat Transfer and Adsorption Cooling Performance of MIL-101/Few Layer Graphene Composite,» *Energies,* αρ. 14(16), 2021.

[80] M. Sultan, M. Bilal, T. Miyazaki, U. Sajjad και F. Ahmad, «Adsorption-Based Atmospheric Water Harvesting: Technology Fundamentals and Energy-Efficient Adsorbents,» *Technology in Agriculture,* 2020.

[81] M. A. Zoui, S. Bentouba, J. Stocholm και M. Bourouis, «A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications,» *Energies,* αρ. 13(14), 2020.

[82] B. Singh, «Thermoelectric Generators: Design, Operation, and Applications,» σε *New Materials and Devices for Thermoelectric Power Generation*, 2023.

[83] F. Alsouda, N. Bennet, S. Saha, F. Salehi και M. Islam, «Vapor Compression Cycle: A State-of-the-Art Review on Cycle Improvements, Water and Other Natural Refrigerants,» *Clean Technol.,* 2023.

[84] Q. Chen, M. Burhan, M. Kum και M. Shahzad, «Hybrid Indirect Evaporative Cooling-Mechanical Vapor Compression System: A Mini-Review,» *Energies,* 2022.

[85] M. Feng, S. Lv, J. Deng, Y. Guo, Y. Wu, G. Shi και M. Zhang, «An overview of environmental energy harvesting by thermoelectric generators,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* αρ. 187, 2023.

[86] Wartsila, «Ship engines and generating sets,» Wartsila, 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets.

[87] R. Sanchez και G. Wilmsmeier, «The Impact of Transport Costs on International Trade in Containerized Cargo,» *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* αρ. 22, 2023.

[88] DNV, «Maximizing energy efficiency in the tanker segment,» DNV, 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/maximizing-energy-efficiency-in-the-tanker-segment/.

[89] Y. Ning και B. Shen, «Environmental regulations, finance, and firm environmental investments: an empirical exploration,» *Total Quality Management & Business Excellence,* αρ. 35(7), 2024.

[90] W. Chen, B. Fu, J. Zeng και W. Luo, «Research on the Operational Performance of Organic Rankine Cycle System for Waste Heat Recovery from Large Ship Main Engine,» *Appl. Sci.,* αρ. 13(4), 2023.

[91] Vesselfinder, «Newly developed waste heat recovery system by MHI-MME starts operation on Maersk Line vessel,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.vesselfinder.com/news/5859-Newly-developed-waste-heat-recovery-system-by-MHI-MME-starts-operation-on-Maersk-Line-vessel.

[92] Mitsubishi Heavy Industries, «The First ORC Operation Starts on Maersk Line Vessel,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.mhi.com/group/mhimme/news/topics/160413_01.html.

[93] Access Energy, «Maersk Installs Hydrocurrent Waste Heat Recovery,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://access-energy.com/news/maersk-installs-hydrocurrent-waste-heat-recovery.html.

[94] Euronews.green, «What is scrubber water? Ships pollute Baltic Sea to the tune of €680 million in 8 years, study finds,» 2024. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.euronews.com/green/2024/05/09/what-is-scrubber-water-ships-pollute-baltic-sea-to-the-tune-of-680-million-in-8-years-stud.

[95] Scanbox, «MS Birka Stockholm,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.scanbox.se/en/customer/ms-birka-stockholm.

[96] Chalmers University of Technology, «Research reveals large emissions from ship scrubbers,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://phys.org/news/2022-10-reveals-large-emissions-ship-scrubbers.html.

[97] Vesselfinder, «FIGARO Vecicles Carrier,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.vesselfinder.com/vessels/details/9505041.

[98] Istitute of Risk Management, «About Ris Management, Institute of Risk Management,» Institute of Risk Management - IRM, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available:

https://www.theirm.org/about/risk-management. [Πρόσβαση 6 2 2017].

[99] KAYMACOR Micro ORC Systems, «Story of ORC,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.kaymacor.com/rankine-cycle.

[100] C. Ezgi, «Design and Thermodynamic Analysis of Waste Heat-Driven Zeolite–Water Continuous-Adsorption Refrigeration and Heat Pump System for Ships,» *Energies,* αρ. 14(3), 2021.

--- Τέλος εγγράφου ---