



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

«Αξιολόγηση εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων:
Βιβλιογραφική επισκόπηση και εφαρμογή
πολυκριτηριακής μεθόδου»

ΣΟΦΙΑΝΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΜ: 08115025

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΒΕΝΤΙΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ, 2021

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Κεφάλαιο 1: Τα καύσιμα στη διεθνή ναυτιλία, τεχνολογίες και πολιτικές.....	5
Γλωσσάριο.....	5
1.1. Εισαγωγή	6
1.2. Η τρέχουσα κατάσταση της διεθνούς ναυτιλίας	7
1.2.1. Τρέχουσες εκπομπές από τη ναυτιλία.....	8
1.2.2. Διεθνής Διακυβέρνηση Ναυτιλίας και Κανονισμοί.....	11
1.2.3. Ο στόχος εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50%	13
1.3. Τάσεις.....	14
Κεφάλαιο 2: Επιλογές για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα	17
2.1. Εισαγωγή	18
2.1.1. Ποια είναι τα εμπόδια στην ανάπτυξη βιώσιμων θαλάσσιων μεταφορών;	20
2.2. Καινοτόμες τεχνολογίες.....	23
2.3. Εναλλακτικά καύσιμα που ήδη χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία	23
2.3.1. Υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquified natural gas, LNG).....	23
2.3.1.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	24
2.3.1.2. Κόστος καυσίμου για LNG.....	26
2.3.1.3. Κεφαλαιουχικό κόστος για LNG.....	27
2.4. Τεχνολογίες που σχετίζονται με εναλλακτικά καύσιμα	29
2.4.1. Βιοκαύσιμα	30
2.4.2. Μεθανόλη.....	33
2.4.3. Υδρογόνο με θαλάσσιες κυψέλες καυσίμου	34
2.4.4. Ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης	37
2.5. Κυψέλες καυσίμου.....	38
2.5.1. Τύποι κυψελών καυσίμου.....	39
2.5.2. Αξιολόγηση κυψελών καυσίμου για τη ναυτιλία	39
2.5.3. Κόστος και εφαρμογή.....	41
2.5.4. Προοπτική DNV	41
2.6. Τεχνολογικά – Λειτουργικά Μέτρα.....	42
2.6.1. Αργός ατμός.....	42
2.6.2. Χρώματα και επιχρίσματα κύτους	44
2.6.3. Ανάκτηση θερμότητας αποβλήτων	46

2.6.4. Επεξεργασία καυσαερίων	47
2.7.Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	48
2.7.1. Βοήθεια στον άνεμο	48
2.7.2. Ηλιακή βοήθεια	48
2.7.3. Πυρηνική θαλάσσια πρόωση.....	49
2.8. Συνδυασμένη δυνατότητα απαλλαγής από τον άνθρακα	50
2.9. Τεχνολογίες για τη μείωση ρύπων στα υπάρχοντα καύσιμα: Επιχειρησιακά μέτρα/ Μέτρα που σχετίζονται με την αγορά	56
Πολιτικές απαλλαγής από τον άνθρακα.....	56
2.9.1. Επιλογές πολιτικής για την απομάκρυνση της ναυτιλίας από άνθρακα	56
2.9.1.1. Έλεγχοι τιμών εκπομπών.....	57
2.9.1.2. Έλεγχοι ποσότητας εκπομπών.....	57
2.9.1.3. Επιδοτήσεις.....	58
2.9.2. Προτάσεις μηχανισμού που βασίζονται στην αγορά	58
2.9.3. Αξιολόγηση των επιλογών πολιτικής	60
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία	63
3.1. Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων	63
3.2. Η πολυκριτηριακή ανάλυση	67
3.3. Μέθοδος TOPSIS	68
3.4. Περιγραφή Μεθοδολογίας.....	70
3.4.1. Γενικά Κριτήρια Επιλογής.....	71
3.4.2. Μέθοδος επιλογής σεναρίων.....	72
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	74
4.1. Εφαρμογή Μεθόδου TOPSIS	74
4.2. Ανάλυση Ευαισθησίας Βαρύτητας Κριτηρίων	77
4.3. Συμπεράσματα.....	83
Παράρτημα.....	87
Βιβλιογραφικές αναφορές	89

Περίληψη

Ο τομέας της ναυτιλίας καλύπτει πάνω από το 80% των μεταφορών παγκοσμίως. Το γεγονός αυτό δύσκολα θα μεταβληθεί καθώς η ζήτηση των αγαθών όλο και αυξάνεται αλλά και επειδή δεν υπάρχει άλλος, πιο οικονομικός και αποτελεσματικός, τρόπος μεταφοράς τους. Η ραγδαία αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης του πλανήτη είναι ένα θέμα μείζονος σημασίας, με τη ναυτιλία να κατέχει σημαντικό ρόλο στην αύξηση αυτή. Το μεγαλύτερο ποσοστό των πλοίων κινούνται μέσω μηχανών εσωτερικής καύσης, που έχουν ως καύσιμο το ναυτιλιακό πετρέλαιο. Κατά την καύση του πετρελαίου απελευθερώνονται επιβλαβή αέρια στην ατμόσφαιρα όπως τα οξείδια του θείου (SO_x), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Στην εποχή που ζούμε, ο όρος «Πράσινη Ενέργεια» έχει καταλάβει μεγάλο μέρος του παγκοσμίου συστήματος, χωρίς να αφήνει εκτός τη ναυτιλία. Παγκόσμιοι θεσμοί όπως ο IMO (Παγκόσμιος Οργανισμός Ναυτιλίας), έχουν αναλάβει δράση θεσπίζοντας νόμους και πλαίσια για τον περιορισμό των εκπομπών αυτών. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, επίσης, έχει συμβάλει στη δημιουργία νέων μέσων για την επεξεργασία των καυσαερίων καθώς και εύρεση νέων, φιλικών προς το περιβάλλον, καυσίμων. Τέτοια μέσα αποτελούν οι κυψελίδες καυσίμων και τέτοια καύσιμα η μεθανόλη, το υδρογόνο. Οι παράγοντες για την επιλογή των κατάλληλων λύσεων είναι κυρίως οικονομικοί, περιβαλλοντικοί και τεχνολογικοί. Η συγκεκριμένη μελέτη αξιολογεί συγκεκριμένα εναλλακτικά καύσιμα λαμβάνοντας υπόψιν τους διάφορους παράγοντες και καταλήγει σε αυτό που είναι πιο κατάλληλο για την επίτευξη του στόχου του 2050. Συμπερασματικά, μπορεί να αναφερθεί πως η βέλτιστη λύση για την επίτευξη του στόχου αυτού εκτιμάται ότι είναι η χρήση βιοκαυσίμων. Λύση που μπορεί να επιτύχει ταχύτερα το σκοπό της με ταυτόχρονη χρήση τεχνολογικών και λειτουργικών μέτρων. Σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική και η ηλιακή, δεν μπορούν ακόμα να χρησιμοποιηθούν αυτούσιες ως καύσιμα αλλά ως βοηθητικά μέσα πρόωσης. Τέλος, η μελέτη αυτή λαμβάνει χώρα σε ιδανικές συνθήκες λόγω του ότι κάθε είδος πλοίου χρήζει διαφορετικής αντιμετώπισης σχετικά με την εύρεση ιδανικής μεθόδου για την επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί.

Abstract

The shipping sector is accountable for over 80% of the world's transportation. This fact will hardly change as the demand for goods is increasing and there is also no other way, more economical and efficient to transport them. The rapid increase in global air pollution is a major issue, with shipping being an important part of this increase. The vast majority of ships are powered by internal combustion engines, which are fueled by marine fuel oil. Combustion of oil releases harmful gases into the atmosphere such as sulfur oxides (SO_x), nitrogen oxides (NO_x), particulate matter (PM). Nowadays, "green energy" has taken over much of the global system, especially shipping. Global institutions such as the IMO (World Maritime Organization) have taken action by enacting laws and frameworks to limit these emissions. The development of technology has also contributed to the creation of new means for treatment of exhaust gases as well as finding new, environmentally friendly fuels. Such media are fuel cells and such fuels are methanol, hydrogen. The factors for choosing the right solutions are mainly economic, environmental and technological. This study evaluates specific alternative fuels taking into account the various factors and the most appropriate for achieving the 2050 target. In conclusion, it can be stated that the best solution to achieve this target is the use of biofuels. A solution that can achieve its purpose faster with the simultaneous use of technological and operational measures. Regarding renewable energy sources such as wind and solar, they can not yet be used as such as fuel but as auxiliary means of propulsion. Finally, this study takes place in ideal conditions due to the fact that each type of ship needs a different approach to finding the ideal method to achieve the set goal.

Κεφάλαιο 1: Τα καύσιμα στη διεθνή ναυτιλία, τεχνολογίες και πολιτικές

Γλωσσάριο

BAU	Business as usual
ECA	Emission control area
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EP	Electric Propulsion
ETS	Emission Trading Scheme
FOC	Flag of convenience
HFO	Heavy Fuel Oil
IGF	Code International Gas Fuelled Ship Code
IMO	International Maritime Organisation
IMS	International Maritime Services
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
ITF	International Transport Workers' Federation
MARPOL	Maritime Agreement Regarding Oil Pollution
MBM	Market-based mechanism
MDO	Marine Diesel Oil
MEPC	Maritime Environment Protection Committee
METS	Maritime Emission Trading Scheme
MGO	Marine Gas Oil
RoRo	Roll on – Roll off Ship
SCR	Selective Catalytic Reduction
WHRS	Waste Heat Recovery Systems
WSC	World Shipping Council

1.1. Εισαγωγή

Η θαλάσσια ναυτιλία αποτελεί βασικό στοιχείο της παγκόσμιας οικονομίας που αντιπροσωπεύει το 90% του διεθνούς εμπορίου [1]. Οι θαλάσσιες μεταφορές εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα ανά τόνο-χιλιόμετρο σε σύγκριση με άλλες μορφές μεταφοράς [2, 3, 4], αλλά δεδομένης της μεγάλης κλίμακας του, ο θαλάσσιος τομέας συμβάλλει σημαντικά στις παγκόσμιες οικολογικές επιπτώσεις [5]. Η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι υπεύθυνη για τις εκπομπές περίπου 1,1 Gt διοξειδίου του άνθρακα, αντιπροσωπεύοντας το 3% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (greenhouse gas, GHG) παγκοσμίως, καθώς και 2,3 Mt διοξειδίου του θείου και 3,2 Mt οξειδίων του αζώτου ετησίως [6, 7, 8]. Για το περιβάλλον, υπάρχουν μόνο πέντε χώρες στον κόσμο που εκπέμπουν περισσότερα αέρια θερμοκηπίου από τον τομέα της ναυτιλίας. Αυτή η συνεισφορά αναμένεται να αυξηθεί καθώς το παγκόσμιο θαλάσσιο εμπόριο αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 3% ετησίως στις αρχές της δεκαετίας του 2020 [9], και ακόμη και σε φιλόδοξα σενάρια απορρόφησης άνθρακα η κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται κατά 40-50% μεταξύ 2015 και 2050 [10], ενώ άλλοι τομείς προχωρούν με ταχεία απορρόφηση άνθρακα.

Παρά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ο τομέας ήταν σε μεγάλο βαθμό ανεξέλεγκτος μέχρι πρόσφατα [5]. Έχουν τεθεί αυστηροί στόχοι για τη σημαντική μείωση των εκπομπών NO_x και SO_x που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα [11] και, το κυριότερο, το 2018 ο IMO έθεσε ως στόχο την παγκόσμια ναυτιλία να απαλλαγεί από άνθρακα κατά τουλάχιστον 50% από τα επίπεδα του 2008 έως το 2050 [12].

Όπως και σε άλλους τομείς, δεν υπάρχει ιδανικό σενάριο για την απαλλαγή από άνθρακα. Είναι πιθανό ότι η μείωση κατά το ήμισυ των εκπομπών άνθρακα θα απαιτήσει μια σειρά επιλογών, συμπεριλαμβανομένων νέων πηγών καυσίμων, αύξησης της τεχνικής ή της λειτουργικής απόδοσης και της μείωσης της ζήτησης. Η ναυτιλία έχει υποστεί αλλαγές στο καύσιμο στο παρελθόν, από άνθρακα σε ντίζελ τη δεκαετία του 1920 και από ντίζελ σε βαρύ μαζούτ (heavy fuel oil, HFO) τη δεκαετία του 1950 [13]. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied natural gas, LNG) είναι το κύριο εναλλακτικό καύσιμο σε σχέση με τα υγρά ορυκτά καύσιμα, προσφέροντας μειωμένες επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και άμεσες εκπομπές CO₂, αν και οι εκπομπές μεθανίου έχουν αποδειχθεί ότι μειώνουν το όφελος του GHG [14]. Άλλες εναλλακτικές λύσεις περιλαμβάνουν βιοκαύσιμα, μεθανόλη, υδρογόνο, ηλεκτρική πρόωση ή ακόμη

και πυρηνικά καύσιμα, αλλά κάθε προσφορά διαθέτει διαφορετικά επίπεδα απορρόφησης άνθρακα και συνεπάγονται διαφορετικό οικονομικό κόστος καθώς και ρύπους που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα. Ομοίως, υπάρχουν διάφορα μέτρα απόδοσης που θα μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης, ιδιαίτερα την πράξη αργού ατμού. Αλλά ο αντίκτυπός τους στην απόδοση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η κατηγορία του σκάφους και η εφαρμογή του.

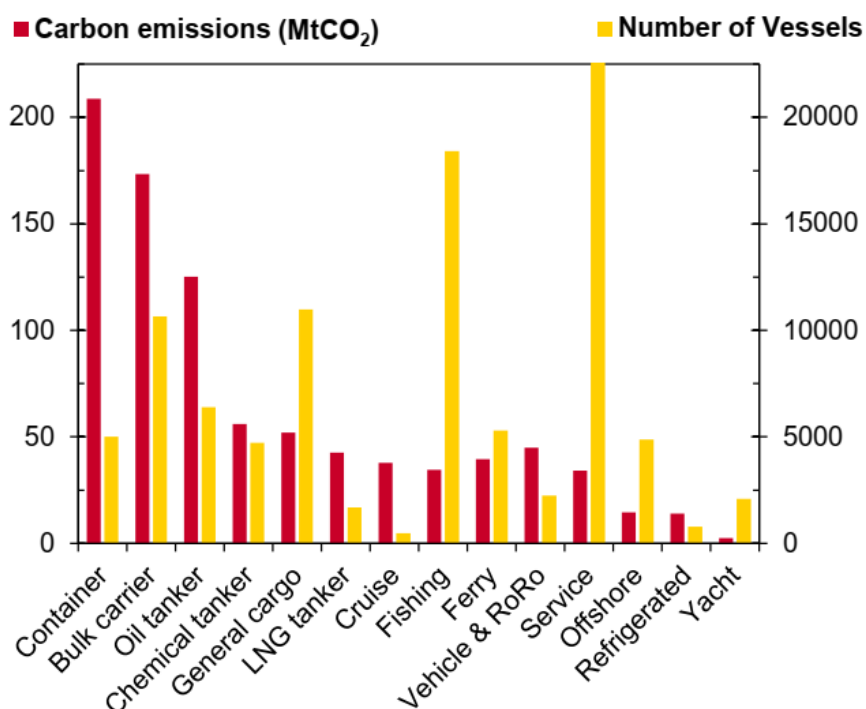
Αυτή η εργασία εξετάζει διάφορους τύπους καυσίμων, τεχνολογιών και πολιτικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία. Για κάθε επιλογή, γίνεται θεωρητική αξιολόγηση της σκοπιμότητας από τεχνική, οικονομική και πολιτική σκοπιά. Για κάθε καύσιμο αντλούνται συγκεκριμένα ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια, γίνεται επιμέρους αξιολόγησή τους σύμφωνα με την πολυκριτηριακή μέθοδο TOPSIS και εξάγεται το συμπέρασμα για το πιο κατάλληλο για χρήση ώστε να επιτευχθεί ο στόχος που έχει τεθεί για το 2050.

Στην παρούσα εργασία, περιγράφεται η τρέχουσα κατάσταση της ναυτιλιακής βιομηχανίας, όσον αφορά τους στόλους, τα καύσιμα, τις εκπομπές και τα τρέχοντα κανονιστικά πλαίσια. Οι επόμενες παράγραφοι ποσοτικοποιούν τις πιθανές επιπτώσεις που σχετίζονται με διαφορετικές μορφές καυσίμου, συμπεριλαμβανομένου του υγροποιημένου φυσικού αερίου (liquefied natural gas, LNG), των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των πυρηνικών επιλογών. Σε επόμενη παράγραφο αξιολογείται ο αντίκτυπος των διαφόρων μέτρων ενεργειακής απόδοσης, προτού αξιολογηθούν οι μηχανισμοί πολιτικής για την επίτευξη μειώσεων των εκπομπών ως προς την τρέχουσα κατάσταση και το μελλοντικό δυναμικό.

1.2. Η τρέχουσα κατάσταση της διεθνούς ναυτιλίας

Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχουν περίπου 56,000 εμπορικά πλοία που συμβάλλουν στη διεθνή αποστολή εμπορευμάτων και επιβατών (βλ. **Σχήμα 1.1**). Για μια αίσθηση κλίμακας, αυτά τα πλοία κινούνται με 500 GW χωρητικότητας κινητήρα [26], περισσότερο από ολόκληρο τον στόλο της Ευρώπης με σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα [27]. Υπάρχει σημαντική ετερογένεια σε ολόκληρο τον εμπορικό

στόλο με διαφορετικές υπηρεσίες, πλοία, καύσιμα, εκπομπές και κανονισμούς, επομένως δεν υπάρχει μια λύση απαλλαγής από άνθρακα που να ταιριάζει σε όλους. Τα παρακάτω περιγράφουν την τρέχουσα κατάσταση της διεθνούς ναυτιλίας σχετικά με τις εκπομπές, τη χρήση καυσίμων και τα κανονιστικά περιβάλλοντα.

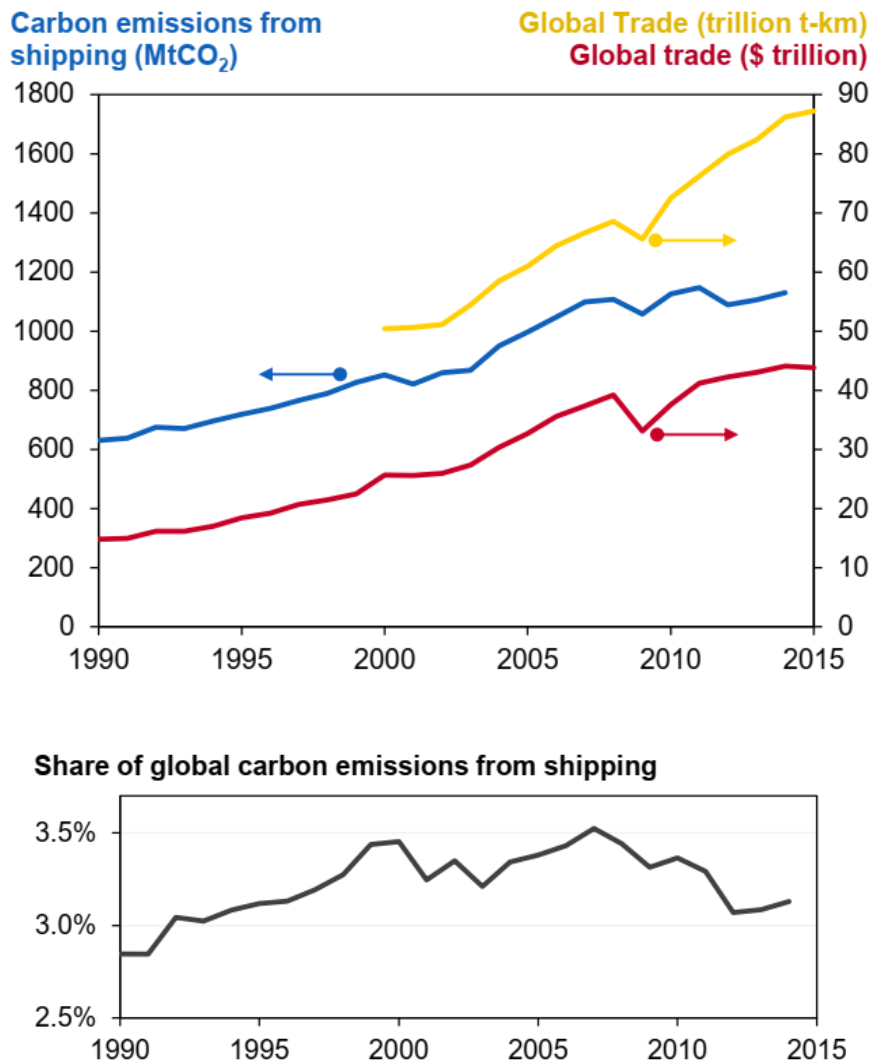


Σχήμα 1.1. Αριθμός εμπορικών πλοίων και εκπομπές άνθρακα, κατά κατηγορία το 2017. Το Ferry περιλαμβάνει επιβάτες και επιβάτες-RoRo (roll-on roll-off). Στοιχεία από [26].

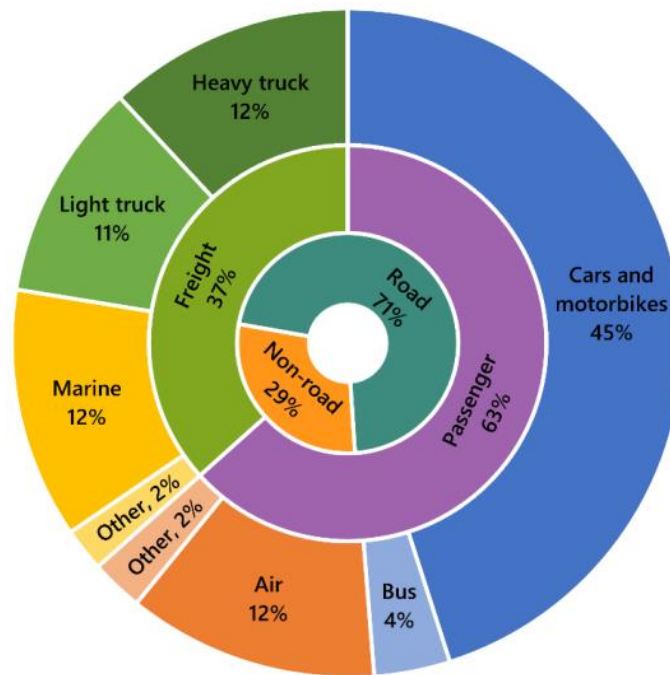
1.2.1. Τρέχουσες εκπομπές από τη ναυτιλία

Τα θαλάσσια φορτία είναι υπεύθυνα για το 12% της παγκόσμιας ενέργειας που καταναλώνεται για μεταφορές (βλέπε **Σχήμα 1.3**), συνολικά περίπου 13 εκατομμύρια TJ το 2015, ή 1,4 kWh ανά άτομο ανά ημέρα παγκοσμίως [28]. Το 2014, η διεθνής ναυτιλία εκπέμπει 1130 Mt CO₂, η οποία αντιπροσωπεύει το 3,1% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ [29]. Αυτή η συμβολή μειώθηκε τα τελευταία 5 χρόνια από την παγκόσμια χρηματοπιστωτική κρίση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.2**, σε μεγάλο βαθμό λόγω της αύξησης των άλλων εκπομπών εκτός της ναυτιλίας και όχι της ναυτιλίας από

άνθρακα [29]. Η μεγαλύτερη πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία προέρχεται από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, φορτηγά χύδην και δεξαμενόπλοια, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.1**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά τα σκάφη πραγματοποιούν μεγαλύτερα ταξίδια για να παραδώσουν το φορτίο τους - διεθνείς και διηπειρωτικές, παρά εσωτερικές και ακτογραμμές [29].



Σχήμα 1.2. Εκπομπές CO₂ από την παγκόσμια ναυτιλία σε σύγκριση με το παγκόσμιο εμπόριο (επάνω πίνακας), και το σχετικό μερίδιο των εκπομπών CO₂ που προέρχονται από τη ναυτιλία (κάτω πίνακας). Δεδομένα από [2, 8, 29, 30].



Σχήμα 1.3. Ανάλυση της χρήσης ενέργειας στον τομέα των μεταφορών παγκοσμίως το 2015. Ο εξωτερικός δακτύλιος δίνει το μερίδιο των επιμέρους τρόπων λειτουργίας, οι μεσαίοι και οι εσωτερικοί δακτύλιοι συγκεντρώνουν αυτές τις χρήσεις. Στοιχεία από [31]

Οι εκπομπές από τη ναυτιλία εξαρτώνται από τα καύσιμα και την αποτελεσματικότητα: διαφορετικά καύσιμα έχουν διαφορετικές εκπομπές CO₂, SO_x, NO_x και μεθανίου και τα αναποτελεσματικά πλοία χρησιμοποιούν περισσότερο καύσιμο. Από τα περίπου 300 Mt παγκόσμιας κατανάλωσης θαλάσσιου καυσίμου το 2015, το 72% ήταν υπολειμματικά καύσιμα (π.χ. βαρέως μαζούτ, heavy fuel oil, HFO), 26% αποστάγματα (π.χ. πετρέλαιο ντίζελ) και 2% υγροποιημένο φυσικό αέριο (liquefied natural gas, LNG) [32]. Το HFO τυπικά έχει υψηλή περιεκτικότητα σε θείο [33] και η συμβολή της διεθνούς ναυτιλίας στις παγκόσμιες εκπομπές SO_x το 2012 υπολογίστηκε σε 13% ετησίως [34]. Οι εκπομπές SO_x προκαλούν επιπτώσεις στην υγεία, καθώς επίσης προκαλούν ζημιά στο οικοσύστημα μέσω της οξίνισης στο νερό και το έδαφος [35]. Το 2009, τα 15 μεγαλύτερα πλοία προκάλεσαν περισσότερη θειώδη ρύπανση από ό, τι ο παγκόσμιος στόλος αυτοκινήτων (760 μέτρα αυτοκίνητα) μαζί [36].

Οι εκπομπές θείου και οξειδίων του αζώτου έχουν βραχυχρόνια κλιματική ψύξη, πράγμα που σημαίνει ότι ο καθαρός αντίκτυπος της ναυτιλίας πάνω από 20 χρόνια (βάσει εκπομπών ενός έτους) είναι στην πραγματικότητα να μειώσει τις

παγκόσμιες θερμοκρασίες [37]. Ωστόσο, ο μακροπρόθεσμος αντίκτυπος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία είναι σίγουρα ότι θα αυξηθούν. Τα καύσιμα απόσταξης όπως το πετρέλαιο θαλάσσης (marine gas oil, MGO) και το πετρέλαιο ντίζελ (diesel oil, MDO) έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο, ενώ οι εκπομπές GHG και NO_x, που προκύπτουν από την καύση σε υψηλή θερμοκρασία, μπορεί να είναι παρόμοιες [18, 38, 39].

Οι θαλάσσιες εκπομπές μαύρου άνθρακα έχουν επίσης μεγάλες επιπτώσεις στο κλίμα και στην ανθρώπινη υγεία. Ο μαύρος άνθρακας είναι ένας τύπος λεπτών σωματιδίων (PM 2.5) που εκπέμπεται από την καύση HFO και σε μικρότερο βαθμό MDO. Το GWP του μαύρου άνθρακα ποικίλλει ανάλογα με τη θέση και την πηγή, αλλά σε μορφή αερολύματος έχει GWP 100 ετών 830 [37]. Ως στερεό σωματίδιο, η διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα είναι μικρή και της τάξεως 1 εβδομάδας [40], αλλά οι παγκόσμιες εκπομπές μαύρου άνθρακα αντιπροσωπεύουν το 5-8% των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε χρονική κλίμακα 100 ετών σύμφωνα με το ICCT [41].

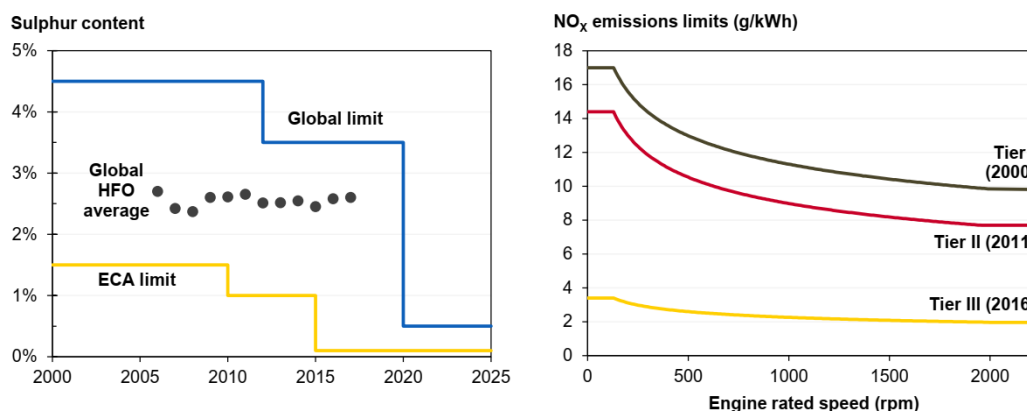
1.2.2. Διεθνής Διακυβέρνηση Ναυτιλίας και Κανονισμοί

Ο IMO είναι ένας οργανισμός του ΟΗΕ υπεύθυνος για την ασφάλεια και τον περιβαλλοντικό κανονισμό της παγκόσμιας ναυτιλίας. Έχει 172 κράτη μέλη και τρία συνδεδεμένα μέλη [42]. Οι κανονισμοί του IMO πρέπει να επικυρωθούν από περισσότερα από τα μισά κράτη μέλη, τα οποία στη συνέχεια μεταφράζονται στο εσωτερικό δίκαιο. Ωστόσο, η διαδικασία συμμόρφωσης περιπλέκεται από το κράτος σημαίας του αντίστοιχου πλοίου και την έννοια «σημαίες της ευκολίας» (FOC).

Τα FOC είναι εκείνα που χαρακτηρίζονται από χαμηλή φορολογία και χαμηλότερα κανονιστικά μέτρα και ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1920 όταν οι ιδιοκτήτες πλοίων των ΗΠΑ άρχισαν να καταχωρούν τα πλοία τους στον Παναμά, αφού απογοητεύτηκαν από τους αυξημένους κανονισμούς και το αυξανόμενο κόστος εργασίας. Από το 2015, πάνω από το 55% της παγκόσμιας ακαθάριστης χωρητικότητας στη διεθνή ναυτιλιακή βιομηχανία είναι καταχωρημένο στα κορυφαία 12 κράτη FOC, όπως προσδιορίστηκε από τη Διεθνή Ομοσπονδία Εργαζομένων Μεταφορών (International Transport Workers' Federation, ITF) [101]. Οι περιφερειακές αρχές

ελέγχου του κράτους του λιμένα (Port State Control, PSC) παρακολουθούν τα FOC και ποσοτικοποιούν τα επίπεδα αξιοπιστίας και συμμόρφωσής τους.

Ο βασικός κανονισμός για τον έλεγχο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη ναυτιλία είναι η θαλάσσια συμφωνία σχετικά με τη ρύπανση από πετρέλαιο (MARPOL) για τις εκπομπές SO_x, NO_x και GHG. Ο κανονισμός επικεντρώθηκε αρχικά στο SO_x, περιορίζοντας την περιεκτικότητα σε θείο στα καύσιμα αποθήκης στο 4,5% και σταδιακά μειώνεται με την πάροδο του χρόνου όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.4**. Το παγκόσμιο όριο περιεκτικότητας σε θείο ορίζεται ότι θα μειωθεί σημαντικά το 2020 στο 0,5%, ωστόσο, ο παγκόσμιος μέσος όρος θείου το περιεχόμενο του HFO δεν έχει αλλάξει ουσιαστικά σύμφωνα με τους στόχους [13].



Σχήμα 1.4. Κανονισμοί θείου και οξειδίων του αζώτου (NO_x) για τη μεταφορά καυσίμων. Στο αριστερό πλαίσιο, οι γραμμές εμφανίζουν τα όρια του παραρτήματος VI της MARPOL για ανοιχτές θάλασσες και σε περιοχές ελέγχου εκπομπών (emissions control areas, ECAs). Τα σημεία δείχνουν τον παγκόσμιο μέσο όρο σε καύσιμα HFO [2, 13, 29]. Στο δεξιό πλαίσιο, οι γραμμές δείχνουν τα όρια ως συνάρτηση των στροφών του κινητήρα για ανοιχτές θάλασσες (Tier II) και περιοχές ελέγχου (Tier III) [43].

Ο IMO (μέσω της MARPOL) δημιούργησε επίσης περιοχές ελεγχόμενες εκπομπές (Emission Controlled Areas, ECA), εντός των οποίων τα σκάφη πρέπει να συμμορφώνονται με αυστηρότερα όρια εκπομπών [44]. Επί του παρόντος υπάρχουν τέσσερα ECA, στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική, τα οποία θέτουν επίσης όρια στις εκπομπές NO_x και σωματιδίων [45]. Το παράρτημα VI της MARPOL, που εισήχθη το 1997 και ενισχύθηκε το 2005 [46], περιλαμβάνει ρυθμιστικά όρια για τις εκπομπές NO_x. Διαφορετικές βαθμίδες συμμόρφωσης ισχύουν για πλοία με διαφορετικές

ημερομηνίες κατασκευής όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 1.4, αν και οι πιο αυστηροί κανονισμοί βαθμίδας II ισχύουν μόνο για πλοία που εκτελούν δρομολόγια σε EEA [47].

Μια άλλη προσθήκη στη MARPOL το 2001 ήταν ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Efficiency Design Index, EEDI), για τη μείωση των εκπομπών CO₂ για νέα πλοία μέσω βελτιώσεων τεχνικής απόδοσης [48]. Το EEDI καθορίζει ένα ελάχιστο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης ανά μίλι χωρητικότητας (π.χ. τόνος μίλι) για διαφορετικούς τύπους και μεγέθη πλοίων [6]. Θέτοντας στόχο 10% μείωση των επιπέδων CO₂ (γραμμάρια CO₂ ανά τόνο μίλι) έως το 2015, 20% έως το 2020 και 30% έως το 2025, ο EEDI στοχεύει στη διευκόλυνση της καινοτομίας και των τεχνολογικών βελτιώσεων στη ναυτιλία, ενισχύοντας τον στόχο κάθε 5 χρόνια [48, 49]. Το σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) εισήχθη επίσης στη MARPOL, τόσο για νέα όσο και για υπάρχοντα πλοία, ως μέτρο βελτίωσης της αποδοτικότητας καυσίμου μέσω βελτιώσεων λειτουργίας [46]. Ωστόσο, ενώ υπάρχει απαίτηση για την εφαρμογή του σχεδίου, δεν προβλέπεται ειδική εξοικονόμηση καυσίμου ή βελτιώσεις στην απόδοση [50].

Ο EEDI είναι προς το παρόν η μόνη πολιτική εκπομπών άνθρακα για τον μετριασμό των εκπομπών CO₂ στη διεθνή ναυτιλία και εκτιμάται ότι ο παγκόσμιος στόλος ναυτιλίας δεν θα συμμορφώνεται πλήρως με το EEDI έως το 2040-2050 [49]. Ωστόσο, οι μειώσεις είναι αμελητέες σε σύγκριση με τα επίπεδα που απαιτούνται για την επίτευξη των παγκόσμιων στόχων του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή 2050 [29].

1.2.3. Ο στόχος εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50%

Το 2018, ο IMO ανακοίνωσε μια αρχική συμφωνία για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% έως το 2050 σε σύγκριση με τις εκπομπές του 2008 [12], με μια σταθεροποιημένη στρατηγική που θα εφαρμοστεί το 2023. Αυτός ο στόχος δεν πρέπει να υποτιμηθεί όσον αφορά την πρόκλησή του, επίσης ως δυνητικό όφελος για τις παγκόσμιες οδούς απαλλαγής από τον άνθρακα. Οι συνήθεις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τη ναυτιλιακή βιομηχανία αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά το πρώτο μισό του αιώνα, με τα σενάρια εκπομπών του IMO να προβλέπουν ανάπτυξη μεταξύ 50% και 250% έως το 2050-ανάλογα με την οικονομική ανάπτυξη [29]. Οι μειώσεις των εκπομπών θα μπορούσαν να προέλθουν από την αύξηση της

αποδοτικότητας των σκαφών, όπως μέσω του EEDI, ή από μια σταδιακή αλλαγή στη χρήση καυσίμων.

Παράλληλα με τη συμφωνία του IMO, προτάθηκαν διάφορα μέτρα πολιτικής για βραχυπρόθεσμα (2018-2023), μεσοπρόθεσμα (2023-2030) και μακροπρόθεσμα (μετά το 2030). Τα βραχυπρόθεσμα μέτρα περιλαμβάνουν την ενίσχυση του EEDI, την παροχή κινήτρων για έγκαιρη υιοθέτηση τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, παροχή κινήτρων για μείωση/βελτιστοποίηση ταχύτητας, ανάπτυξη κατευθυντήριων γραμμών έντασης άνθρακα για όλα τα θαλάσσια καύσιμα και έρευνα για καινοτόμες τεχνολογίες και καύσιμα για πρόωση μηδενικού άνθρακα. Τα μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα μέτρα είναι η περαιτέρω ανάπτυξη των βραχυπρόθεσμων μέτρων και η εξέταση της εφαρμογής μηχανισμών που βασίζονται στην αγορά για την παροχή κινήτρων για τη μείωση των εκπομπών. Το πλήθος των τεχνικών μέτρων για την επίτευξη των στόχων των εκπομπών, καθώς και τα πολιτικά μέσα για την εφαρμογή τους, είναι πολύπλευρα και αναθεωρούνται σε βάθος για το υπόλοιπο αυτής της εργασίας.

1.3. Τάσεις

Η συζήτηση και η αβεβαιότητα σχετικά με την ενεργειακή μετάβαση τείνουν να εστιάζουν στο τι μπορεί και τι δεν μπορεί να κάνει η τεχνολογία. Πολύ συχνά, τέτοιες συζητήσεις περιλαμβάνουν ευχολόγια, υπεράσπιση μιας προτιμώμενης τεχνολογίας ή αναφορά σε παρωχημένες πληροφορίες. Στην παρούσα εργασία αναφέρονται πληροφορίες που προέρχονται από τους κορυφαίους παίκτες στον κόσμο στον τομέα της ενέργειας στο τομέα της ναυτιλίας. Επειδή ο ρυθμός της μετάβασης εντείνεται, η περιγραφή οποιασδήποτε τεχνολογίας είναι σαν να ζωγραφίζει κανείς ένα τρένο που κινείται γρήγορα. Προσπαθείτε να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ τεχνικών λεπτομερειών και ζητημάτων ασφάλειας, αποδοτικότητας, κόστους και ανταγωνιστικότητας. Οι τεχνολογίες μετάβασης είναι βαθιά αλληλένδετες και σε ορισμένες περιπτώσεις αλληλεξαρτώμενες. Κάθε συζήτηση για το πράσινο υδρογόνο, για παράδειγμα, πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις εξελίξεις στον τομέα της ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου και τεχνολογίες τελικής χρήσης, όπως οι κυψέλες καυσίμου.

Η ανάλυση δεν είναι εξαντλητική, αλλά αυτή η τεχνολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το ρυθμό και την κατεύθυνση της ενεργειακής μετάβασης. Κυμαίνονται από σχετικά ώριμες τεχνολογίες όπως η ηλιακή φωτοβολταϊκή, σε τεχνολογίες όπως η πυρηνική σύντηξη που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από την εμπορευματοποίηση. Ως εκ τούτου, η αναφορά τεχνολογικής προόδου αποτελεί ουσιαστικό συμπλήρωμα της κύριας πρόβλεψης για τη μετάβαση στην ενέργεια. Στόχος είναι να πραγματοποιηθεί μια αντικειμενική και ρεαλιστική αξιολόγηση της κατάστασης αυτών των τεχνολογιών και να αξιολογηθεί πώς συμβάλλουν στην ενεργειακή μετάβαση στο μέλλον. Η προσοχή στην πρόοδο σε αυτές τις τεχνολογίες θα είναι ζωτικής σημασίας για όποιον ασχολείται με την ενέργεια.

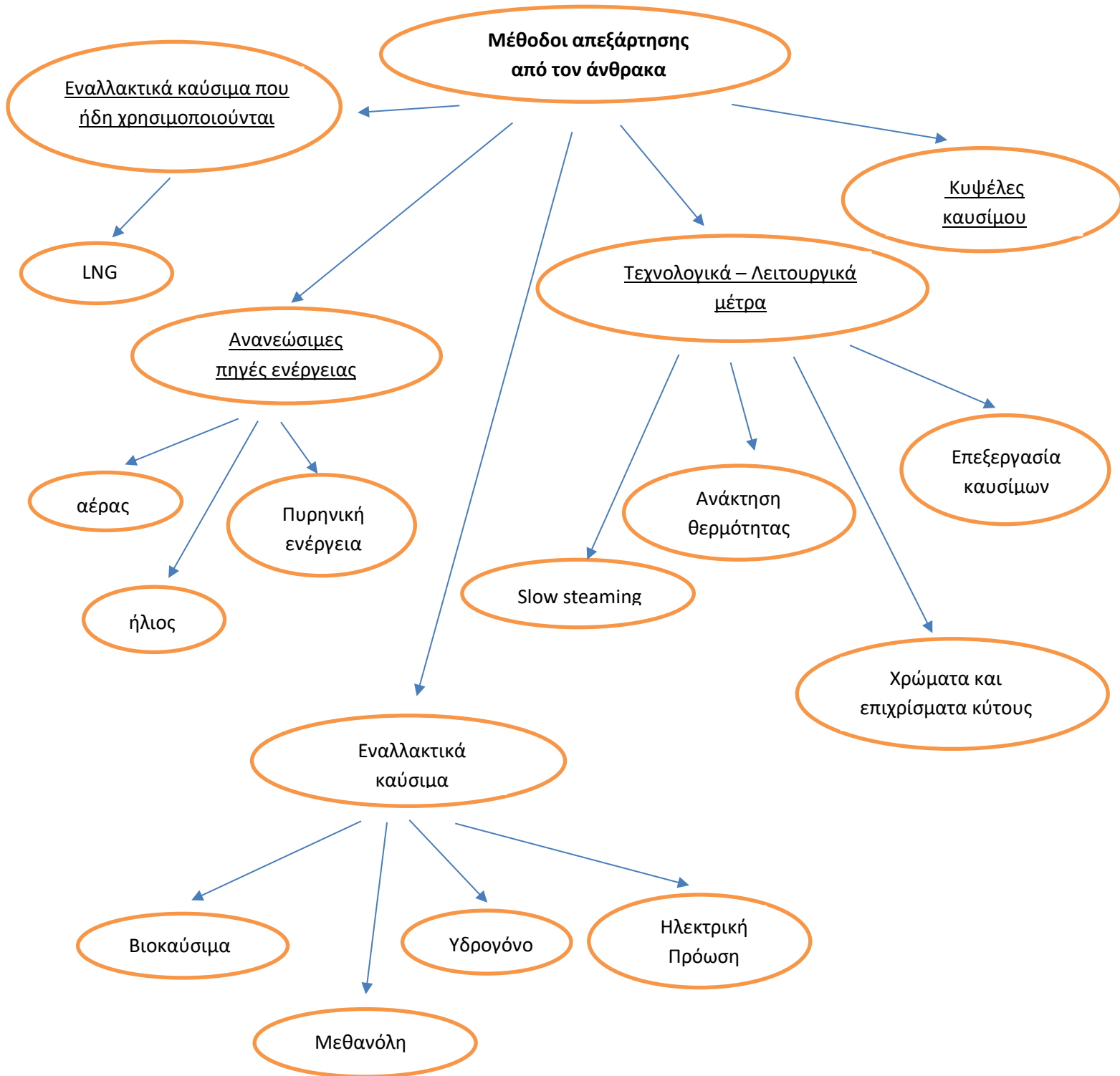
Εκτός από τον συνολικό στόχο της απαλλαγής από τον άνθρακα, υπάρχουν και άλλες τρέχουσες τάσεις που επηρεάζουν την ανάπτυξη και τις αλλαγές στο ενεργειακό σύστημα. Η καθολική πρόσβαση στη σύγχρονη, καθαρή και ασφαλή ενέργεια αποτελεί βασικό παγκόσμιο στόχο. Η ψηφιοποίηση και οι προσπάθειες αντιμετώπισης της τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης ωθούν επίσης την πρόοδο της ενεργειακής τεχνολογίας. Με βάση αυτές τις προσπάθειες, το ενεργειακό σύστημα μεταβαίνει από ένα που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα σε ένα που βασίζεται σε μια ποικιλία τεχνολογιών που εκπέμπουν σημαντικά λιγότερες ποσότητες CO₂. Μεγάλο μέρος της προόδου μέχρι τώρα έχει πραγματοποιηθεί από την πρόοδο στην τεχνολογία, μια διαδικασία που μερικές φορές περιγράφεται από τον οικονομολόγο Joseph Schumpeter ως «δημιουργική καταστροφή». Νέες καινοτομίες αντικαθιστούν τις υπάρχουσες που έχουν καταστεί παρωχημένες με την πάροδο του χρόνου. Το Model T της Ford, τα αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης του περασμένου αιώνα αντικαθίστανται από τα Mach-E της Ford. Στη δημοσίευση [318], η οποία και ανανεώνεται κάθε χρόνο σύμφωνα με το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, περιγράφεται η καλύτερη εκτίμηση για τη μετάβαση της ενέργειας στο 2050. Κάθε επόμενη δεκαετία θα υπάρξει σημαντικός μετασχηματισμός διαφόρων τμημάτων. Ίσως η δεκαετία του 2020 να παραμείνει ως η «δεκαετία της τεχνολογίας» που προκάλεσε αρκετές τεχνολογίες - σε διαφορετικά στάδια ετοιμότητας - που επηρέασαν βαθιά την ενεργειακή μετάβαση στα χρόνια έως το 2050.

Η υπάρχουσα βιβλιογραφία έχει συμπεριλάβει ευρείες εκτιμήσεις για τις παγκόσμιες οδούς απαλλαγής από τον άνθρακα [2, 15], καθώς και ορισμένες συγκεκριμένες εκτιμήσεις των μέτρων μείωσης των εκπομπών που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση ή τον σχεδιασμό των πλοίων [2, 16, 17], ή από εναλλακτικά

καύσιμα [18, 19]. Συγκεκριμένα, στη μελέτη [16] συνοψίζεται ένα μεγάλο ποσοστό βιβλιογραφίας σχετικά με τις πιθανές μειώσεις εκπομπών που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση, το σχεδιασμό των πλοίων και τις αλλαγές καυσίμων. Προτείνεται ένας συνδυασμός τεχνολογιών που θα είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες μειώσεις και ότι πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις των άλλων εκπομπών εκτός CO₂ (όπως μεθάνιο, NO_x και SO_x). Στη μελέτη [20] τίθεται η εκτιμώμενη παγκόσμια εξοικονόμηση CO₂ από μια επιλογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης υπό αβεβαιότητα, ενώ μερικές μελέτες εκτιμούν την αποδοτικότητα κόστους και τις δυνατότητες μείωσης των εκπομπών των μέτρων ενεργειακής απόδοσης [21] και καυσίμων για τους παγκόσμιους στόλους [22]. Πολλές μελέτες αναλύουν επίσης τους μηχανισμούς πολιτικής που μπορούν να επιτύχουν την απελευθέρωση της ναυτιλίας, όπως μηχανισμούς που βασίζονται στην αγορά (market-based mechanisms, MBM) και περαιτέρω νομοθεσία για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας [2, 23, 25].

Τα αποτελέσματα των περισσότερων μελετών είναι συνήθως ένας συνδυασμός καυσίμων. Στη μελέτη [318] για να επιτευχθεί ο στόχος του 2050 θα πρέπει μέχρι τότε ο παγκόσμιος στόλος να αποτελείται από περίπου το 1/3 του με πλοία που χρησιμοποιούν ναυτιλιακό πετρέλαιο, περίπου 1/3 να χρησιμοποιούν βιοκαύσιμα, περίπου 1/3 μπαταρίες και τα υπόλοιπα LNG καθώς και scrubbers (πλυντρίδες). Στη μελέτη [176], που έχει πραγματοποιηθεί για μικρότερους χρονικούς ορίζοντες, το 2035 ο παγκόσμιος στόλος θα πρέπει να αποτελείται από περίπου 70% από πλοία που χρησιμοποιούν υδρογόνο και αμμωνία, 20% βιοκαύσιμα και τα υπόλοιπα ναυτιλιακό πετρέλαιο και LNG. Τέλος, στην μελέτη [317] εκτιμάται ότι θα υπάρχουν δραματικές αλλαγές στα καύσιμα. Την επόμενη δεκαετία θα υπερισχύσουν τα βιοκαύσιμα ενώ μέχρι το 2050 τα καύσιμα που προκύπτουν από την ηλεκτρική ενέργεια (electro-fuels). Γενικότερα πάντως θεωρείται ότι για να επιτευχθεί ο στόχος του 2050 τα πλοία θα πρέπει να κινούνται με ένα από τα δύο αναφερθέντα καύσιμα.

Κεφάλαιο 2: Επιλογές για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα



Σχήμα 2. Μέθοδοι απεξάρτησης από τον άνθρακα σε δενδρική δομή

2.1. Εισαγωγή

Οι μελέτες του Διεθνούς Συμβουλίου για Καθαρές Μεταφορές (International Council on Clean Transportation, 2011) [197] και του IMO [194] συμφωνούν με το εύρος των τεχνολογικών και επιχειρησιακών στρατηγικών που διαθέτει ο τρέχων παγκόσμιος στόλος. Αυτές περιλαμβάνουν καινοτομία σε: στίλβωση έλικας, καθαρισμό κύτους, μείωση ταχύτητας, αναβάθμιση αυτόματου πιλότου, λίπανση αέρα, βελτιώσεις κύριων κινητήρων, βελτιστοποίηση ροής νερού, επίστρωση κύτους, αντλίες και ανεμιστήρες ταχύτητας, δρομολόγηση καιρού, φωτισμός υψηλής απόδοσης, αναβάθμιση έλικας, σπατάλη θερμότητας μείωση, εναλλακτικά καύσιμα, αιολική ενέργεια και ηλιακή τεχνολογία. Αυτές οι αναλύσεις σημειώνουν επίσης ότι, εκτός από τα τρία τελευταία στοιχεία, αυτά είναι σε μεγάλο βαθμό ήδη διαθέσιμα και οι περισσότεροι υπεύθυνοι φορείς χρησιμοποιούν ήδη, τουλάχιστον εν μέρει. Κανένα από αυτά τα μέτρα δεν επιτυγχάνει μεμονωμένα περισσότερες από μικρές εξοικονομήσεις, ούτε αντιπροσωπεύει καμία σημαντική αλλαγή παραδείγματος. Το κόστος πολλών από αυτές τις καινοτομίες τις καθιστά μη διαθέσιμες στη ναυτιλία, όπου μεγάλο μέρος του περιουσιακού στοιχείου βρίσκεται στο τέλος της εργασιακής ζωής του και είναι αναποτελεσματικό ή αναποτελεσματικό για αναβάθμιση.

Οι περισσότεροι διεθνείς φορείς εκμετάλλευσης ήδη εφαρμόζουν μια πολιτική «αργού ατμού» (slow steaming), μειώνοντας τις μέσες ταχύτητες διέλευσης για να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου, ιδίως από τη στιγμή που η παγκόσμια οικονομία επιβραδύνθηκε από το 2008. Η παραγωγή μεγαλύτερων πλοίων οδηγεί σε μεγαλύτερη οικονομία κλίμακας και σχέδια νέας γενιάς που ενσωματώνουν πιο αποδοτικό κύτος. Το LNG στοχεύει όλο και περισσότερο ως το κύριο καύσιμο για μεγάλες και νέες ναυτιλιακές μεταφορές. Τέτοιες εξελίξεις θα ωφελήσουν σχεδόν αποκλειστικά τη ναυτιλιακή αγορά μεγάλης κλίμακας και προσφέρουν ελάχιστες άμεσες δυνατότητες για το σενάριο όπου τα πλοία είναι μικρότερα και παλαιότερα. Θα μπορούσαν να περάσουν μερικές δεκαετίες προτού μια τέτοια τεχνολογία είναι προσιτή σε μεταχειρισμένο τρόπο σε χειριστές. Μπορεί να περιγραφεί ως ένα κλασικό σενάριο διαίρεσης Βορρά-Νότου. Όσοι φορείς εκμετάλλευσης έχουν πρόσβαση σε επενδυτικά κεφάλαια για την προμήθεια νέας τεχνολογίας έχουν λειτουργικό πλεονέκτημα. Όσοι μπορούν να αντέξουν οικονομικά μόνο μεταχειρισμένα πλοία (τρίτο, τέταρτο ή πέμπτο) θα πρέπει να περιμένουν στην ουρά και να πληρώσουν συνεχώς αυξανόμενο

κόστος και ποινές. Ποιες επιλογές είναι διαθέσιμες από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας; Υπάρχει μια ποικιλία λύσεων που είναι δυνητικά διαθέσιμες, που κυμαίνονται από διάφορα μέτρα για την αναβάθμιση υφιστάμενων πλοίων με ορυκτά καύσιμα με τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έως υβριδικά σκάφη που συνδυάζουν τόσο ανανεώσιμη ενέργεια όσο και ορυκτά καύσιμα, έως ειδικά σχέδια μη ορυκτών καυσίμων. Το καθένα έχει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με την εφαρμογή τους. Πολλοί ερευνητές ερευνούν καινοτομίες στο σχεδιασμό του κύτους και του κινητήρα και του ανέμου (αξιοποιούνται από πανιά, χαρταετούς και ρότορες), ηλιακό, βιοαέριο/βιοκαύσιμο για σκάφη όλων των τύπων, αν και η επένδυση δεν είναι τίποτα της κλίμακας που προορίζεται για την ανάπτυξη της συμβατικής ναυτιλίας. Και πάλι, οι περισσότερες πρωτοβουλίες για λύσεις νέας τεχνολογίας επικεντρώθηκαν στη ναυτιλία μεγάλης κλίμακας.

Έχει γίνει ελάχιστη δουλειά στα σκάφη 10,000 τόνων και μικρότερα σκάφη που εξυπηρετούν τον περισσότερο αναπτυσσόμενο κόσμο και συνεισφέρουν το 26% όλων των παγκόσμιων εκπομπών ναυτιλίας, ενώ μεταφέρουν μόνο το 4% του παγκόσμιου φορτίου φορτίου [196]. Υπάρχουν δημοφιλείς λανθασμένες αντιλήψεις που εμποδίζουν τη σοβαρή συζήτηση των θεμάτων των σκαφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε αυτήν την κλίμακα, συμπεριλαμβανομένου ότι αυτά τα σκάφη θα είναι πιο αργά και λιγότερο αξιόπιστα, ότι οι εξέδρες ιστιοφόρου και ρότορα αυξάνουν την αστάθεια σε κακές καιρικές συνθήκες (όταν η πραγματικότητα είναι το αντίθετο), και ότι τα μεγαλύτερα πλοία είναι εγγενώς ασφαλέστερα και αποτελεσματικότερα. Κορυφαία παραδείγματα περιλαμβάνουν το χύδην φορτηγό B9 3000 dwt, το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων Ecoliner 7000 dwt και το E-Ship1 της Enercon 127 m.

Αν και έχει αναφερθεί οποιοσδήποτε αριθμός πιθανών τεχνολογιών στη βιβλιογραφία, οι κύριοι υποψήφιοι καταρρέουν κυρίως σε εναλλακτικά καύσιμα όπως βιοκαύσιμα ή βιοαέριο (για τα οποία υπάρχουν ερωτηματικά για το συνολικό περιβαλλοντικό όφελος στην απαιτούμενη κλίμακα), αιολική ενέργεια και ηλιακή. Στην Ωκεανία, τα βιοκαύσιμα/αέρια από την τοπική καλλιέργεια (η καρύδα και η μανιόκα έχουν υψηλό δυναμικό) ή το υποπροϊόν (π.χ. μελάσα από τη βιομηχανία ζάχαρης των Φίτζι) προσφέρουν δυνατότητες. Τελικά θα καταλήξει στα οικονομικά της παραγωγής τέτοιων καυσίμων έναντι του κόστους εισαγωγής ορυκτών καυσίμων ως προς το πόσο γρήγορα αναπτύσσεται και απορροφάται. Η ηλιακή ενέργεια έχει δυναμικό ως βοηθητικό σε άλλα καύσιμα, αλλά δεν είναι αρκετά εξελιγμένο για να

παρέχει την κύρια πρόωση. Η αιολική ενέργεια έχει ισχυρές δυνατότητες σε μια ποικιλία εφαρμογών, είναι καλά κατανοητή και αποδεδειγμένη. Τα υβριδικά σκάφη, που συνδυάζουν περισσότερους από έναν τύπους πηγής ενέργειας, προσφέρουν μια προσέγγιση «του καλύτερου και των δύο κόσμων». Ο σχεδιασμός ενός σκάφους από το μη κερδοσκοπικό οργανισμό με έδρα την Ιαπωνία, Greenheart, προσφέρει ισχυρές δυνατότητες για εξαιρετικά οικονομικά φορτηγά 220 τόνων, 100% ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για εμπορικές συναλλαγές μεταξύ νησιών και διαπεριφερειακών χωρών, συντηρητικά εκτοπίζοντας περίπου ενάμιση τόνο καύσιμα την ημέρα. Ένα πιλοτικό σκάφος είναι υπό κατασκευή στο Μπαγκλαντές. Συνεχίζονται οι εργασίες για τη χρήση καταμαράν φορτίου/επιβατών μικρής κλίμακας (4-10 dwt) για περισσότερες από τρεις δεκαετίες σε διαφορετικές τοποθεσίες του Ειρηνικού. Καμία από αυτές τις πρωτοβουλίες δεν ήταν επιτυχής στην προσέλκυση επαρκούς χρηματοδότησης για έρευνα και ανάπτυξη, σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παρά τις αποδεδειγμένες δυνατότητές τους τόσο για εξοικονόμηση καυσίμου όσο και για θετική συμβολή στην οικονομική ανάπτυξη.

Η ναυτιλία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσφέρει οφέλη σε πολλαπλές επίπεδα: οικονομικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και πολιτιστικά [198]. Προσφέρει ένα δυνητικό μέλλον όπου στόλοι μικρότερων αλλά βιώσιμων νέων πλοίων μπορούν να αντικαταστήσουν τις τρέχουσες πτήσεις μεγάλου και μεγάλου σκάφους. Η υλοποίηση αυτού απαιτεί πρακτική επίδειξη εμπορικά βιώσιμων μοντέλων, εάν πρόκειται να επιτευχθεί αναβάθμιση σε οποιαδήποτε κλίμακα. Η ατζέντα πρέπει τελικά να εξεταστεί από το δυναμικό της να αναζωογονήσει όλες τις πτυχές της εγχώριας βιομηχανίας του Ειρηνικού, από την κατασκευή πλοίων έως τις μεταφορές έως τη συντήρηση και τον τερματισμό της ανακύκλωσης-προσέγγιση από κοιτίδα σε λίκνο. Η λειτουργία του νέου στοιχείου μεταφοράς είναι προφανώς η πρώτη κρίσιμη πτυχή που αποδεικνύεται πρακτικά, αλλά η μακροπρόθεσμη ευκαιρία είναι ευρύτερη και περιλαμβάνει σχεδιασμό, έρευνα, κατασκευή, συντήρηση και βοηθητικές βιομηχανίες καθώς και ναυτιλία.

2.1.1. Ποια είναι τα εμπόδια στην ανάπτυξη βιώσιμων θαλάσσιων μεταφορών;

Υπάρχουν πολλές προκλήσεις για περαιτέρω διερεύνηση και πρακτική δοκιμή της ναυτιλίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προκειμένου να αποδειχθεί πλήρως η

εγκυρότητά της. Αυτά είναι περίπλοκα και δεν χαρακτηρίζονται καλά ή γίνονται κατανοητά. Τα θέματα πολιτικής, ιδιοκτησίας, χρηματοδότησης και διαχείρισης, όχι η ίδια η τεχνολογία, είναι τα κεντρικά που πρέπει να αντιμετωπιστούν τώρα. Είναι ουσιαστικό να αναγνωριστεί ότι η βιομηχανική εφαρμογή πρέπει να πραγματοποιηθεί σε ένα ευρύτερο περιβάλλον από μια απλή οικονομική ή εμπορική σφαίρα.

Τα ευρήματα από μια πρόσφατη ανάλυση [198] αντικατοπτρίζουν τα διδάγματα από τη μελέτη Ha'arai στη δεκαετία του 1980 και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα πρωταρχικά εμπόδια στην έρευνα και στην πρακτική δοκιμή εναλλακτικών λύσεων είναι δομικά και αντιληπτικά. Οι θαλάσσιες μεταφορές γενικά θεωρούνται ιδιωτικό επενδυτικό ζήτημα με δημόσιες ή χορηγίες που περιορίζονται αποκλειστικά στις υποδομές της ξηράς (κυρίως στα λιμάνια), την πολιτική και τους κανονισμούς. Η πρόσβαση στη χρηματοδότηση των περιουσιακών στοιχείων της ναυτιλίας είναι ιδιαίτερα δύσκολη από κάθε άποψη για αυτόν τον συχνά περιθωριακό κλάδο. Τα παλιά πλοία που αντικαθίστανται με παλιά πλοία ή η εξάρτηση από δωρεά και συχνά ακατάλληλα σκάφη είναι ο καθιερωμένος κανόνας στα περισσότερα ΣΜΕ. Οι εμπορικές τράπεζες δεν βρίσκουν την εγχώρια νησιωτική ναυτιλία ελκυστική για δανεισμό λόγω του υψηλού κινδύνου για χαμηλές αποδόσεις και της έλλειψης επαρκών εξασφαλίσεων. Υπάρχουν επίσης πολιτισμικά εμπόδια. Οι μεγαλύτεροι και ταχύτεροι κινητήρες και πλοία θεωρούνται ως δείκτες της αυξανόμενης ανάπτυξης, ενώ η χρήση τεχνολογιών όπως τα πανιά θεωρείται ως ένα βήμα μακριά από την πρόοδο και την ανάπτυξη. Υπάρχει επίσης λαϊκή λανθασμένη αντίληψη ότι η τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα είναι πιο αργή και λιγότερο αποδοτική από ό, τι τα αντίστοιχα ορυκτά καύσιμα.

Δυστυχώς, παρά την εγγενή λογική της διερεύνησης των βιώσιμων θαλάσσιων μεταφορών ως περιφερειακής προτεραιότητας, δεν έχει ακόμη υιοθετηθεί ούτε από την εμπορική βιομηχανία ούτε από τους οργανισμούς ανάπτυξης/πολιτικής. Ένα από τα κύρια εμπόδια για την πρόσβαση σε χρηματοδότηση για οποιαδήποτε πτυχή της εναλλακτικής ναυτιλίας εδώ και παγκοσμίως είναι η σχεδόν αόρατη σχεδόν ορατότητα των θαλάσσιων μεταφορών στον χώρο της πολιτικής. Η βιώσιμη ναυτιλία δεν αναφέρεται μέχρι σήμερα σε καμία εθνική, περιφερειακή ή αναπτυξιακή υπηρεσία του Ειρηνικού για την ενέργεια, τις μεταφορές ή την κλιματική αλλαγή.

Παρόλο που οι προτάσεις για ναυτιλία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό ώριμη και αποδεδειγμένη τεχνολογία για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, οι πρακτικές επιλογές επίδειξης βρίσκονται είτε σε

πρώιμο στάδιο ανάπτυξης είτε έχουν υιοθετηθεί μόνο σε πολύ μικρή κλίμακα. Αυτό συμβαίνει συχνά για τις νέες τεχνολογίες καθώς συνήθως δεν μπορούν να ανταγωνιστούν αμέσως στην αγορά έναντι των καθιερωμένων τεχνολογιών [200]. Οι ισχύοντες κανονισμοί, οι υποδομές, οι πρακτικές χρηστών και τα δίκτυα συντήρησης ευθυγραμμίζονται με την υπάρχουσα τεχνολογία, πράγμα που σημαίνει ότι οι νέες τεχνολογίες αντιμετωπίζουν συχνά αναντιστοιχία με το καθιερωμένο κοινωνικο-θεσμικό πλαίσιο [200]. Το ίδιο ισχύει για τις τρέχουσες κρατικές επιδοτήσεις του Ειρηνικού. Στην περίπτωση αυτή, προκύπτουν τρεις βασικές και συναφείς προτεραιότητες: συμπερίληψη της ναυτιλίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως προτεραιότητα στο χώρο πολιτικής σε εθνικό, περιφερειακό και οργανιστικό επίπεδο, την ανάγκη για ολοκληρωμένη οικονομική μοντελοποίηση του πρωτογενούς, δευτερογενούς και τριτογενούς κόστους και οφέλη από τις εναλλακτικές τεχνολογίες και προσεγγίσεις · και πρόσβαση σε χρηματοδότηση ανάπτυξης για πρακτικές δοκιμές εμπορικών εναλλακτικών λύσεων.

Είναι απίθανο να υπάρξουν σημαντικές ιδιωτικές επενδύσεις μέχρι να υπάρξει κάποια ραγδαία μεταβολή τόσο στον χώρο πολιτικής όσο και στην ιεράρχηση των χορηγών. Χωρίς τέτοια παρέμβαση είναι απίθανο η πρακτική επίδειξη εναλλακτικών να προχωρήσει σε οποιαδήποτε κλίμακα και σίγουρα όχι στο επίπεδο που απαιτείται για ουσιαστική αλλαγή. Ανατρέχοντας στην τελευταία πετρελαϊκή κρίση, διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει τίποτα νέο στις αρνητικές απαντήσεις σε αυτό που κατά τα άλλα είναι μια λογική και ορθολογική προσέγγιση σε ένα κεντρικό ζήτημα υψηλής στρατηγικής σημασίας για τους περισσότερους PIC και η τρέχουσα κατάσταση είναι σε μεγάλο βαθμό επανάληψη γεγονότων περισσότερων από πριν από 30 χρόνια.

Η μεγαλύτερη αλλαγή στο περιβάλλον των πόρων από τη δεκαετία του 1980 είναι η κλιματική αλλαγή. Ωστόσο, παρά την εγγενή λογική της ναυτιλίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως προτεραιότητας εστίασης στην προσαρμογή, ο τομέας τιμωρείται και πάλι. Επειδή η διεθνής ναυτιλία θεωρείται μόνο ως προτεραιότητα μετριασμού, οι βιώσιμες θαλάσσιες μεταφορές δεν θεωρούνται γενικά ότι πληρούν τα κριτήρια για τέτοια κεφάλαια. Ακόμη και όταν η επέμβαση αφήνεται στον ιδιωτικό τομέα, η ναυτιλία δεν πληροί τα κριτήρια για τις τρέχουσες χρηματοδοτικές διευκολύνσεις, όπως τα δάνεια της Παγκόσμιας Τράπεζας στο πλαίσιο του προγράμματος SEFF, επειδή δεν θα εκτοπίσει καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2. Καινοτόμες τεχνολογίες

Οι προβλέψεις για το 2050 στοχεύουν στην ενίσχυση της λήψης αποφάσεων των πλοιοκτητών καθώς πλοηγούνται στις τεχνολογικές, κανονιστικές και αβεβαιότητες της αγοράς που αφορούν την απαλλαγή από άνθρακα. Το 2020, αναπτύχθηκε μια βιβλιοθήκη σεναρίων, προβάλλοντας τη σύνθεση του στόλου, τη χρήση ενέργειας, το μείγμα καυσίμων και τις εκπομπές CO₂ έως το 2050. Μοντελοποιήθηκαν 16 διαφορετικοί τύποι καυσίμων και 10 συστήματα τεχνολογίας καυσίμου. Το 2021, θα βελτιωθεί και θα επεκταθεί ακόμα περισσότερο αυτό το έργο, αλλά για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας επιλέχθηκαν νέες τεχνολογίες ναυτιλίας.

2.3. Εναλλακτικά καύσιμα που ήδη χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία

2.3.1. Υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquified natural gas, LNG)

Ένας τρόπος για τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις SO_x και NO_x και τη μείωση των εκπομπών CO₂ είναι μέσω καυσίμου LNG. Το φυσικό αέριο υγροποιείται με ψύξη στους -162°C και έτσι καταλαμβάνει 600 φορές λιγότερο χώρο για αποθήκευση και μεταφορά [51]. Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι κινητήρων/στροβίλων LNG που χρησιμοποιούνται σήμερα: ανάφλεξη με σπινθήρα, διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης (4 και 2 χρόνων), διπλό καύσιμο υψηλής πίεσης, και αεριοστροβίλος [52]. Το καθένα έχει διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και αποτελεσματικότητα, ενώ παρουσιάζουν σημαντικά διαφορετικά προφίλ εκπομπών [52]. Το LNG έχει χρησιμοποιηθεί για την πρόωση πλοίων μεταφοράς LNG για περισσότερα από 40 χρόνια, χρησιμοποιώντας το αέριο βράσης που δημιουργήθηκε στις δεξαμενές αποθήκευσης για τη λειτουργία κινητήρων διπλού καυσίμου [53].

Το πρώτο αποκλειστικό πλοίο με καύσιμο LNG κατασκευάστηκε το 2000. Το 2017, υπήρχαν 117 πλοία με καύσιμα LNG (μη μεταφορείς LNG) σε εμπορική λειτουργία, με πολλά νέα πλοία με καύσιμο LNG αυτή τη στιγμή να παράγονται [52, 54]. Στα τέλη του 2020 ο αριθμός αυτός αυξήθηκε στα 175 [320]. Τα τρέχοντα πλοία λειτουργούν κυρίως στην Ευρώπη λόγω των επεκτατικών ECA και τα περισσότερα νέα

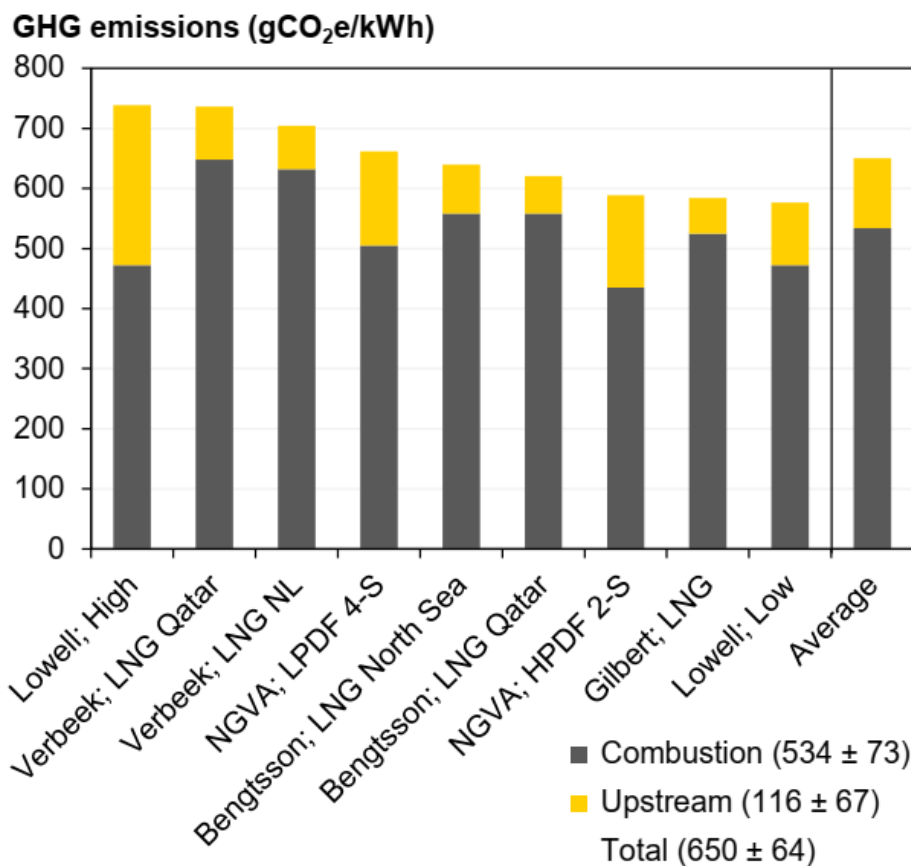
πλοία προγραμματίζονται στην Ευρώπη (57%) και τη Βόρεια Αμερική (38%) λόγω των κανονισμών για τις εκπομπές και των υποκειμένων τιμών καυσίμων [48], [55].

2.3.1.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Τα πιθανά οφέλη του LNG έναντι των συμβατικών υγρών καυσίμων σχετίζονται κυρίως με τις εκπομπές NO_x, SO_x, σωματιδίων και CO₂. Το φυσικό αέριο έχει υψηλότερη αναλογία υδρογόνου-άνθρακα από τα υγρά ορυκτά καύσιμα [56], με αποτέλεσμα 20-30% χαμηλότερες εκπομπές CO₂ κατά την καύση [57]. Ωστόσο, η σχετική βελτίωση των εκπομπών CO₂ μπορεί να αγνοηθεί από τις εκπομπές μεθανίου, ιδίως μέσω της ολίσθησης του κινητήρα [18, 52]. Η ολίσθηση συμβαίνει όταν κάποιο μεθάνιο δεν καίγεται στον κινητήρα, με αποτέλεσμα τη διαρροή στην ατμόσφαιρα [53]. Επιπλέον, μπορεί να συμβεί διαρροή σε άλλα μέρη του κινητήρα, καθώς και σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού φυσικού αερίου γενικά [48, 58, 59]. Το μεθάνιο είναι ένα ισχυρό, αν και βραχύβιο, αέριο θερμοκηπίου και έχει δυνατότητες υπερθέρμανσης του πλανήτη (global warming potential, GWP) 36 φορές ισχυρότερο από το CO₂ σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών [37]. Επί του παρόντος, οι κινητήρες LNG έχουν ολίσθηση μεθανίου 2-5% της συνολικής απόδοσης, αν και οι εκτιμήσεις για τα δίχρονα διπλού καυσίμου υψηλής πίεσης είναι σημαντικά χαμηλότερες [54, 60].

Υπάρχουν διάφορες εκτιμήσεις για τον κύκλο ζωής των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη χρήση LNG ως καύσιμο αποστολής [14, 18, 60-62], μια περίληψη των οποίων δίνεται στο **Σχήμα 1.5**, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων της ανάντη αλυσίδας εφοδιασμού και ανεφοδιασμού και λειτουργίας πλοίων. Οι ανάντη επιπτώσεις προκύπτουν από την εξόρυξη, επεξεργασία και υγροποίηση και μεταφορά πόρων, ενώ οι εκπομπές κατάντη προέρχονται από καύση και διαρροή (ολίσθηση). Οι μελέτες συνήθως εκτιμούν μια σχετική μείωση των εκπομπών με τη μετάβαση από απόσταγμα (π.χ. MDO) ή υπολειμματικό καύσιμο (HFO) σε LNG περίπου 8-20%. Οι εκπομπές ανάντη προκύπτουν κυρίως από τη διαδικασία έντασης ενέργειας υγροποίησης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει το 8-12% της απόδοσης του φυσικού αερίου ως χρέωση καυσίμου [63], καθώς και εκπομπές μεθανίου από την αλυσίδα εφοδιασμού. Οι εκπομπές από το πλοίο καθορίζονται από την απόδοση του κινητήρα και την ολίσθηση του μεθανίου του κινητήρα [64]. Ως εκ τούτου, οι μειώσεις των εκπομπών μεθανίου είναι επιτακτικές εάν το LNG συμβάλλει στον στόχο μείωσης του

GHG κατά 50%. Εάν οι συνολικές εκπομπές μεθανίου ήταν 5,5% κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, τότε το δυναμικό υπερθέρμανσης του ΥΦΑ θα ήταν ίσο με αυτό των HFO, MDO ή MGO [54].



Σχήμα 1.5. Διάφορες εκτιμήσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από κινητήρες πλοίων με καύσιμο LNG εκφρασμένες ανά kWh ισχύος κινητήρα, χωρισμένες σε ανάντη αλυσίδα εφοδιασμού και εκπομπές πλοίων. Δεδομένα από: [14, 18, 60-62].

Το LNG δεν περιέχει θείο, πράγμα που σημαίνει ότι οι εκπομπές SO_x θεωρητικά μειώνονται στο μηδέν. Σε κινητήρες διπλού καυσίμου απαιτείται ένα μικρό κλάσμα καυσίμου με βάση το πετρέλαιο για την ανάφλεξη [56], αλλά οι μειώσεις των εκπομπών SO_x μπορεί να φθάσουν ακόμα το 90-99% σε σύγκριση με το HFO [52, 65]. Τα σωματίδια (PM) εξαλείφονται επίσης σχεδόν πλήρως [53].

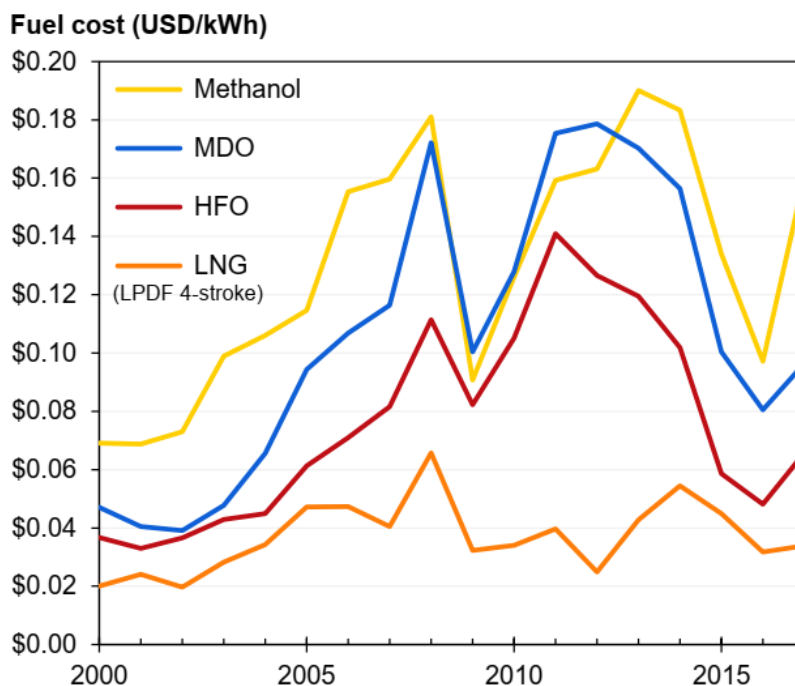
Οι εκπομπές NO_x είναι σημαντικά χαμηλότερες σε ένα σύστημα κινητήρων χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου από τα υγρά καύσιμα. Οι εκπομπές NO_x εξαρτώνται από τη θερμοκρασία καύσης, με υψηλότερες θερμοκρασίες να έχουν ως αποτέλεσμα περισσότερα NO_x. Μια λιτή αναλογία καυσίμου-αέρα που επιτυγχάνεται με ορισμένους κινητήρες LNG και το υψηλότερο ποσοστό αερίου με κινητήρα διπλού

καυσίμου επιτρέπει χαμηλότερη θερμοκρασία καύσης [66] και μειωμένες εκπομπές NOx κατά 75-90% σε σχέση με τον HFO [52, 56, 65]. Ωστόσο, υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ εκπομπών NOx και μεθανίου: οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τις χαμηλές εκπομπές NOx, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερη ολίσθηση μεθανίου. Για κινητήρες διπλής καύσης υψηλής πίεσης, η ολίσθηση μεθανίου μπορεί να μειωθεί στο ~0,2% της απόδοσης [60], αλλά οι εκπομπές NOx δεν θα πληρούν τα πρότυπα της κατηγορίας 3 χωρίς περαιτέρω επεξεργασία καυσαερίων [52].

Για τους κινητήρες διπλού καυσίμου, η σχέση μεταξύ του μείγματος καυσίμου και των εκπομπών CO₂ είναι σε γενικές γραμμές γραμμική, αλλά σημαντικές μειώσεις εκπομπών NOx παρατηρούνται μόνο κάτω από το μερίδιο του 30% του ντίζελ [66]. Συνεπώς, χωρίς πρόσθετες τεχνολογίες επεξεργασίας καυσαερίων, για παράδειγμα επιλεκτική καταλυτική μείωση (SCR), η αναλογία καυσίμου πετρελαίου θα περιοριστεί από τους κανονισμούς για τις εκπομπές NOx που καθορίζονται στα ECA NOx.

2.3.1.2. Κόστος καυσίμου για LNG

Η ανάπτυξη του φυσικού αερίου από σχιστόλιθο της Βόρειας Αμερικής και η επακόλουθη πτώση της τιμής του φυσικού αερίου αύξησε τη βιωσιμότητα του LNG ως θαλάσσιου καυσίμου εκτός Ευρώπης [67]. Το **Σχήμα 1.6** δείχνει τις μέσες τιμές καυσίμων για διάφορα διαθέσιμα καύσιμα αποστολής, υποθέτοντας την τρέχουσα μέση απόδοση κινητήρα: LNG = 6,2 kWh/kg καυσίμου [52, 60]. HFO = 5,0 kWh/kg [18, 62]; MDO = 5,4 kWh/kg [18, 60, 62]; μεθανόλη = 2,5 kWh/kg. Μετά το 2008, η εμπορευματική αγορά πέρασε σε ύφεση, ενώ οι τιμές των bunker αυξήθηκαν, οδηγώντας την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών καυσίμων [48]. Το 2015 η τιμή των HFO μειώθηκε ξανά, αλλά ακόμη και με αυξημένη ανταγωνιστικότητα στις τιμές, εξακολουθεί να υπάρχει ενδιαφέρον για το LNG ως καύσιμο στη θάλασσα λόγω των περιβαλλοντικών παραγόντων.



Σχήμα 1.6. Μέσο κόστος καυσίμου για κάθε έτος για διαφορετικά καύσιμα ανά kWh ισχύος κινητήρα. LPDF 4-χρονος = χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου 4 χρόνων λειτουργεί με LNG. Το μέσο κόστος καυσίμου ανά τόνο [28, 68-74] μετατρέπεται σε απόδοση κινητήρα χρησιμοποιώντας τυπικές αποδόσεις κινητήρα.

Η τιμή του LNG είναι γενικά χαμηλότερη από την HFO, ενώ η MDO είναι περίπου 50% ακριβότερη από την HFO. Ωστόσο, η τιμή του LNG ως καυσίμου θαλάσσης περιλαμβάνει μεγάλη αβεβαιότητα, μέσω των μεταβλητών τιμών του φυσικού αερίου και του κόστους της νέας υποδομής LNG που απαιτείται για τις διεθνείς εμπορικές οδούς [48, 67]. Αυτά τα πρόσθετα κόστη εκτιμάται ότι κυμαίνονται μεταξύ 50 USD/t και 630 USD/t πέραν των τιμών του δείκτη φυσικού αερίου [67].

2.3.1.3. Κεφαλαιουχικό κόστος για LNG

Ο Πίνακας 1.1 δείχνει το κόστος κεφαλαίου (CAPEX) για τις τεχνολογίες κινητήρα και εξάτμισης που σχετίζονται με διάφορα καύσιμα. Το κόστος που σχετίζεται με τη μετατροπή του κινητήρα MGO είναι σχετικά μικρό [67], ενώ στη μελέτη [57] εκτιμάται ότι το κόστος κεφαλαίου για ένα πλοίο καυσίμου LNG σε σχέση με ισοδύναμο πετρελαίου-καυσίμου είναι 20-25% ακριβότερο. Ωστόσο, το κόστος των τεχνολογιών

προώθησης LNG μπορεί να μειωθεί καθώς αυξάνονται τα ποσοστά παραγωγής τεχνολογίας [75].

Πίνακας 1.1. Κόστος εγκατάστασης τεχνολογιών καυσίμων σε τρέχοντα πλοία και νέες κατασκευές. Στοιχεία από [67]. MGO = θαλάσσιο αέριο πετρέλαιο. SCR = επιλεκτική καταλυτική μείωση. EGR = ανακυκλοφορία καυσαερίων. Αξίες σε Δολάρια ΗΠΑ 2012.

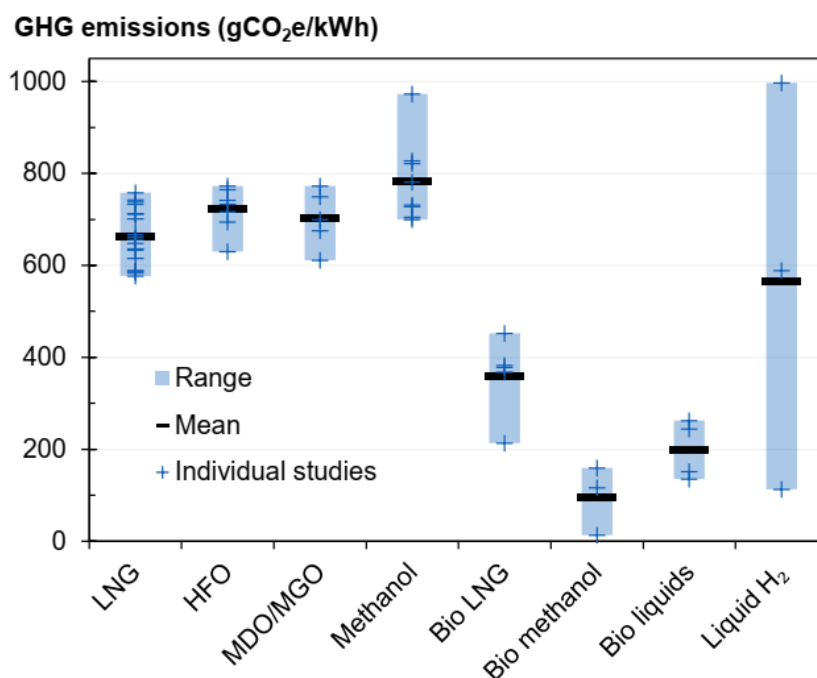
Compliance Strategy	Retrofit cost	Newbuild cost
MGO – engine conversion, SGR, EGR	\$180,000 + \$75 / kW	\$140,000 + \$63 / kW
HFO and scrubber – scrubber and SCR	\$600 / kW	\$2,200 / kW
LNG four stroke dual fuel – LNG tanks, etc.	\$800 / kW	\$1,600 / kW
LNG two stroke dual fuel – LNG tanks, etc.	\$700 / kW	\$1,500 / kW
LNG four stroke spark ignition – LNG tanks, etc.	\$800 / kW	\$1,600 / kW

Οι δεξαμενές αποθήκευσης LNG απαιτούν περίπου διπλάσιο όγκο από τις συμβατικές δεξαμενές αποθήκευσης για το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο, λόγω της διαφοράς πυκνότητας. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά την εκ των υστέρων προσαρμογή και μπορεί να χρειαστεί τροποποίηση της γάστρας [53], επομένως είναι τεχνολογικά και οικονομικά ευνοϊκός ο σχεδιασμός συστημάτων LNG για έργα νέας κατασκευής [67].

Το κόστος προσθήκης λιμενικής υποδομής μπορεί επίσης να είναι σημαντικό [76]. Η προώθηση LNG έχει το μεγαλύτερο οικονομικό πλεονέκτημα για τα σκάφη που εκτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου πλεύσης τους στα ECA. Τα περισσότερα ταξίδια με πλοία κατηγοριοποιούνται είτε ως εκείνα που περνούν περισσότερο από το 80% του χρόνου πλεύσης τους στις ζώνες ECA και αυτά που περνούν λιγότερο από το 5% του χρόνου τους σε ζώνες ECA [53]. Για όσους περνούν λιγότερο από το 5% του χρόνου τους σε ζώνες ECA, υπάρχει ελάχιστο κίνητρο να στραφούν στην προώθηση LNG, καθώς μπορούν να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν HFO και να μεταβαίνουν σε MDO για σύντομα χρονικά διαστήματα σε ECA και λιμένες [48]. Κατά συνέπεια, τα σημερινά πρότυπα εκπομπών δεν είναι ικανοποιητικά για να δημιουργήσουν οικονομικά κίνητρα αρκετά μεγάλα ώστε να προκαλέσουν αλλαγή καυσίμου στο LNG στα μεγαλύτερα σκάφη με περισσότερα παγκόσμια ταξίδια.

2.4. Τεχνολογίες που σχετίζονται με εναλλακτικά καύσιμα

Ενώ το LNG προσφέρει πλεονεκτήματα έναντι των υγρών ορυκτών καυσίμων μέσω μειωμένων εκπομπών ποιότητας αέρα, μπορεί να μην είναι αρκετό για την επίτευξη αυστηρότερων κλιματικών στόχων. Τα πυρηνικά, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα βιοκαύσιμα έχουν επίσης τη δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ στη ναυτιλία και κυμαίνονται από οικονομικά εφικτές βραχυπρόθεσμες επιλογές έως λιγότερο ανεπτυγμένες μακροπρόθεσμες επιλογές. Το **Σχήμα 1.7** δείχνει το εύρος των βιβλιογραφικών εκτιμήσεων των εκπομπών αερίων του κύκλου ζωής για διαφορετικά καύσιμα πλοίων. Σε γενικές γραμμές, οι επιλογές βιοκαυσίμων (βιο-LNG, βιομεθανόλη και άλλα βιο-υγρά) παρουσιάζουν τις χαμηλότερες εκπομπές, ενώ τα συμβατικά καύσιμα μεθανόλης παρουσιάζουν τις υψηλότερες εκπομπές. Κάθε εναλλακτικό καύσιμο συζητείται στην ακόλουθη ενότητα, όσον αφορά τα περιβαλλοντικά και οικονομικά διαπιστευτήριά τους, καθώς και τη διαθεσιμότητα πόρων/πολιτικής.

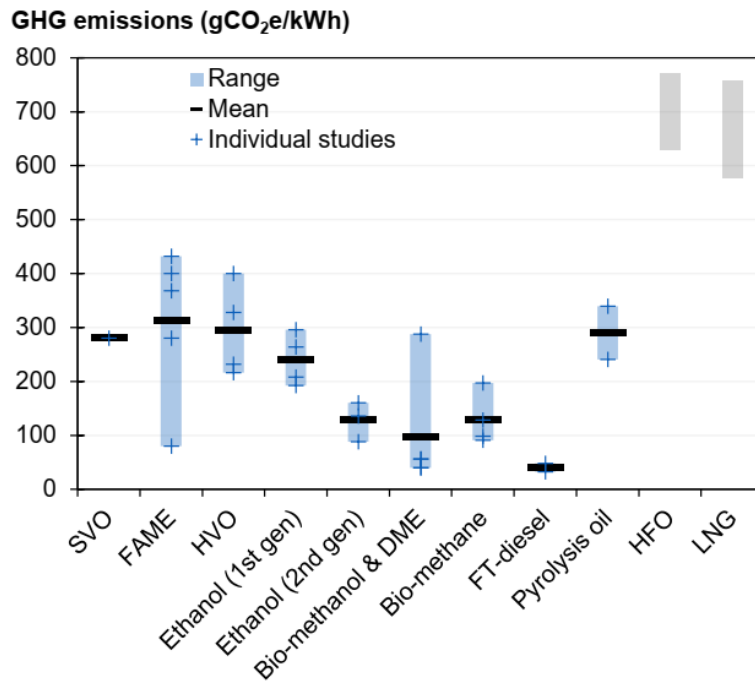


Σχήμα 1.7. Βιβλιογραφικές εκτιμήσεις των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου του κύκλου ζωής για διαφορετικές κατηγορίες καυσίμων. Οι μπλε κύκλοι αντιπροσωπεύουν μεμονωμένες εκτιμήσεις βιβλιογραφίας, οι μαύρες γραμμές αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή για κάθε κατηγορία. Δεδομένα από [14, 18, 39, 60-62, 77-80].

2.4.1. Βιοκαύσιμα

Τα βιοκαύσιμα μπορούν να προσφέρουν μεγάλες μειώσεις εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο «drop-in», απαιτώντας πολύ μικρή αλλαγή στους ισχύοντες κινητήρες [81]. Τα συμβατικά βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς είναι άμεσα διαθέσιμα σήμερα σε σημαντικές ποσότητες, συμπεριλαμβανομένου του απλού φυτικού ελαίου (straight vegetable oil, SVO), του υδρογονοκατεργασμένου φυτικού ελαίου (hydrotreated vegetable oil, HVO), του μεθυλεστέρα λιπαρών οξέων (fatty acid methyl ester, FAME) και της βιοαιθανόλης. Ωστόσο, η χρήση συμβατικών βιοκαυσίμων περιορίζεται διεθνώς λόγω ζητημάτων βιωσιμότητας που σχετίζονται με την παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Η χρήση χρησιμοποιημένων ορυκτελαίων μπορεί να μετριάσει αυτές τις ανησυχίες, αλλά η διαθεσιμότητα των χρησιμοποιημένων ορυκτελαίων για μεγάλη παραγωγή αποτελεί εμπόδιο.

Τα προηγμένα βιοκαύσιμα χρησιμοποιούν πρώτες ύλες με λιγότερες ανησυχίες για τη βιωσιμότητα. Τα πιο εφαρμόσιμα προηγμένα βιοκαύσιμα σε διεθνείς εφαρμογές ναυτιλίας είναι το ντίζελ Fischer-Tropsch (FTDiesel), λάδι πυρόλυσης, λιγνοκυτταρική αιθανόλη (LC αιθανόλη), βιομεθανόλη, διμεθυλαιθέρας (κατασκευασμένο από βιομεθανόλη) και βιο-LNG. Γενικά, τα προηγμένα βιοκαύσιμα έχουν χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τα συμβατικά βιοκαύσιμα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.8**. Το σχήμα δείχνει ένα ευρύ φάσμα εκτιμήσεων εκπομπών τόσο στις κατηγορίες βιοκαυσίμων όσο και εντός αυτών. Σημειώστε ότι οι χαμηλότερες τιμές για το FAME και το HVO είναι τα χρησιμοποιημένα λιπαντικά.



Εικόνα 1.8. Επισκόπηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου για σύγκριση επιλεγμένων βιοκαυσίμων και ορυκτών καυσίμων. Δεδομένα από [79, 82].

Τα βιοκαύσιμα θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών NO_x, SO_x και GHG. Όλα τα βιοκαύσιμα περιέχουν πολύ λίγο θείο [79]. Το FAME για παράδειγμα έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (~20 ppm) και παρουσιάζει χαμηλότερες εκπομπές NO_x και PM από το θαλάσσιο αέριο πετρέλαιο [80]. Επιπλέον, τα βιοκαύσιμα είναι βιοδιασπώμενα, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα έναντι των ορυκτών καυσίμων σε σχέση με τυχαίες διαρροές [79]. Οι εκπομπές SO_x μπορούν να μειωθούν μέχρι 97% ή και περισσότερο. Τα σωματίδια (PM) μπορούν να μειωθούν από 84 μέχρι και 90% [315]. Όμως, οι εκπομπές NO_x ενδέχεται να αυξηθούν κατά 10% (κυρίως με τη χρήση βιο-ντίζελ) αλλά ένας μικρός αριθμός άρθρων αναφέρει μικρή σχετικά μείωση των εκπομπών NO_x. [316]

Καύσιμα που μοιάζουν με ντίζελ, όπως το SVO, HVO, FAME, FT-diesel και το λάδι πυρόλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σημερινούς θαλάσσιους κινητήρες ντίζελ χωρίς ή σε μικρές τροποποιήσεις κινητήρα και μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν τις τρέχουσες υποδομές αποθήκευσης και ανεφοδιασμού [79]. Οι αλκοόλες και τα αέρια καύσιμα όπως η βιοαιθανόλη, η βιομεθανόλη, το βιο-LNG και το βιο-DME απαιτούν πιο σημαντικές αλλαγές στην υποδομή του κινητήρα, της αποθήκευσης και της αποθήκευσης, επιφέροντας πρόσθετο κεφάλαιο. Όλοι απαιτούν κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα, κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση καυσίμου ή

κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, δεδομένου του χαμηλότερου αριθμού κετανίου τους (με εξαίρεση το DME) και δεν μπορούν να αυτοαναφλεγούν [83].

Εμπόδιο στην πρόσληψη βιοκαυσίμων είναι η διαφορά τιμής μεταξύ των υφιστάμενων καυσίμων όπως το HFO, το MDO και τα βιοκαύσιμα. Για παράδειγμα, ο IEA εκτιμά μια τιμή FAME για το 2016 1.040 USD/t και HVO 542 USD/t, πράγματι διπλάσιο της τιμής καυσίμου των ορυκτών ορυκτών MDO (482 USD/t) και HFO (290 USD/t), αντίστοιχα [81]. Το κόστος είναι υψηλότερο για τα προηγμένα βιοκαύσιμα με τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και λιγότερες ανησυχίες για τη βιωσιμότητα, λόγω της πολυπλοκότητας και της ανωριμότητας των διαδικασιών παραγωγής.

Υπάρχει επίσης διαφωνία σχετικά με το αν οι τρέχουσες πρακτικές λογιστικής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι κατάλληλες [84]. Το μέγεθος των βιογενών παραγόντων εκπομπών άνθρακα ποικίλλει σημαντικά με την πάροδο του χρόνου [85], σηματοδοτώντας την ανάγκη για ισχυρή εποπτεία των αλυσίδων εφοδιασμού και της διαχείρισης των δασών [86]. Δεδομένων των διαφορετικών γεωργικών και μεταποιητικών απαιτήσεων και της μεταβλητότητας μεταξύ διαφορετικών πηγών βιοκαυσίμων, η εξασφάλιση χαμηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού βιοκαυσίμων είναι μια σημαντική πρόκληση. Τα ισχυρά νομοθετικά πλαίσια και τα κίνητρα για τη βιοενέργεια, για παράδειγμα μέσω της οδηγίας της ΕΕ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι ένας τρόπος επιβολής βιώσιμων πρακτικών [79]. Ωστόσο, ορισμένες εθνικές και περιφερειακές πολιτικές δεν είναι ακόμη υπέρ των βιοκαυσίμων και η τρέχουσα ταξινόμηση δεν διαφοροποιεί την περιεκτικότητα σε βιογενή άνθρακα και ορυκτό άνθρακα στον Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Efficiency Design Index, EEDI) [79].

Οι ευρύτερες επιπτώσεις των βιοκαυσίμων συνεπάγονται περίπλοκες αντισταθμίσεις στη χρήση πόρων που περιλαμβάνουν απαραίτητα είδη, όπως τρόφιμα και νερό [87]. Το παγκόσμιο δυναμικό για βιοκαύσιμα θα περιοριστεί σε μεγάλο βαθμό αφού υπολογιστούν οι ζωτικές καλλιέργειες και η γη που απαιτούνται για την παροχή τροφής για έναν αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό, οι οποίοι περιλαμβάνουν περιορισμούς στο νερό και τα λιπάσματα για την καλλιέργεια καυσίμων δεύτερης γενιάς [88]. Ορισμένες μελέτες έχουν παραλείψει ακόμη και βιοκαύσιμα από παγκόσμια σενάρια αειφόρου ενέργειας λόγω της πιθανότητας ρύπανσης του αέρα κατά την καλλιέργεια και την επανεπεξεργασία και επειδή η ουδετερότητα του άνθρακα μπορεί να είναι ανέφικτη λόγω της θυσίας των δασών για τις καλλιεργήσιμες

εκτάσεις. Ωστόσο, στην πράξη, τα βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς είναι πιθανό να διαδραματίσουν κάποιο ρόλο για τις μεταφορές σε συνδυασμό με ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια [89], αλλά δεν θα είναι σε θέση να καλύψουν τη συνολική ζήτηση [88].

Συνοψίζοντας, τα βιοκαύσιμα προσφέρουν συμβατές αντικαταστάσεις στα υπάρχοντα ορυκτά καύσιμα θαλάσσης βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα. Το δυναμικό μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου είναι υψηλότερο για βιοκαύσιμα δεύτερης γενιάς, όπου το FT-ντίζελ και το λάδι πυρόλυσης είναι συμβατά με την υποδομή ντίζελ. Άλλα καύσιμα δεύτερης γενιάς όπως η αιθανόλη LC, η βιομεθανόλη, το DME και το βιο-LNG θα απαιτούσαν πολύ μεγαλύτερες αλλαγές στους κινητήρες, την αποθήκευση και την υποδομή. Το κόστος και η διαθεσιμότητα των βιοκαυσίμων, ιδιαίτερα των προηγμένων βιοκαυσίμων, αποτελούν εμπόδιο και δεν θα ανταγωνιστούν εναλλακτικές λύσεις ορυκτών καυσίμων, εκτός εάν θεσπιστεί ισχυρή πολιτική μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου ή τιμή άνθρακα. Ακόμα και τότε, οι πόροι πρέπει να διαχειρίζονται για να διασφαλιστεί ότι οι επιπτώσεις στην ευρύτερη γεωργία και οι πόροι τροφίμων ελαχιστοποιούνται.

2.4.2. Μεθανόλη

Το καύσιμο μεθανόλης για τα πλοία έχει λάβει κάποια προσοχή και υπάρχει προς το παρόν ένας θαλάσσιος κινητήρας που μπορεί να λειτουργεί με μεθανόλη ως διπλό καύσιμο. Μέχρι σήμερα (2018) λειτουργούν 7 πλοία με καύσιμο μεθανόλη, με άλλα 4 να προγραμματίζονται να λειτουργήσουν έως το 2019 [90]. Η καύση μεθανόλης σε θαλάσσιους κινητήρες προκαλεί μέτριες μειώσεις CO₂ και χαμηλές εκπομπές άλλων ρύπων, σε σχέση με το HFO ή το MGO [18, 39]. Η Stena Germanica, το πρώτο θαλάσσιο σκάφος που κινείται με μεθανόλη στον κόσμο, προτείνεται να έχει μειώσει τις εκπομπές SO_x κατά 99%, NO_x κατά 60%, σωματίδια κατά 95% και CO₂ κατά 25%, συμμορφώνοντας έτσι με τους τελευταίους κανονισμούς ECA για τη διαδρομή της στη Βαλτική Θάλασσα [91].

Η μεθανόλη μπορεί να παραχθεί από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, από καταλυτική υδρογόνωση ενός ρεύματος αποβλήτων CO₂ ή από βιομάζα. Στην περίπτωση πρώτης ύλης βιομάζας, οι εκπομπές CO₂ είναι βιογενείς και ενδέχεται να μειωθούν. Ωστόσο, η αλυσίδα εφοδιασμού μεθανόλης παράγει

σημαντικές εκπομπές ανάλογα με την πρώτη ύλη και τη διαδικασία της. Η χρήση μεθανόλης από φυσικό αέριο έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές ποιότητας αέρα, αλλά οι εκπομπές αερίων του κύκλου ζωής είναι περίπου 10% υψηλότερες από αυτές των HFO ή MDO (βλέπε **Σχήμα 1.7**), λόγω της αλυσίδας εφοδιασμού φυσικού αερίου, της αναμόρφωσης αερίου και της σύνθεσης μεθανόλης. Εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν απόβλητα CO₂ (με ανανεώσιμο υδρογόνο) για την παραγωγή μεθανόλης, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη λογιστική άνθρακα: δεν είναι απαραίτητα σκόπιμο να προταθεί ότι, εάν πρόκειται για θερμογόνο απόβλητο προϊόν, οι εκπομπές μειώνονται. Έτσι, οι εκπομπές κύκλου ζωής που σχετίζονται με μεθανόλη από καταλυτική υδρογόνωση μπορεί να είναι σημαντικές, αλλά δεν βρέθηκαν μελέτες που να εκτιμούν τις εκπομπές από αυτήν την οδό παραγωγής.

Το κόστος της μεθανόλης ως καυσίμου είναι μεγαλύτερο από τα υγρά ορυκτά καύσιμα και το LNG, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.6**. Έτσι, ενώ οι εκπομπές της ποιότητας του αέρα μπορεί να μειωθούν σημαντικά, πρέπει να αποδειχθούν τα διαπιστευτήρια άνθρακα των καυσίμων μεθανόλης και στη συνέχεια να δοθούν κίνητρα για να ενθαρρυνθεί η περαιτέρω απορρόφηση.

2.4.3. Υδρογόνο με θαλάσσιες κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού άνθρακα [92], αλλά η διαθεσιμότητα υδρογόνου και η χαμηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα απαιτούν σημαντική πρόσθετη υποδομή και σχεδιασμό συστήματος [88]. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δεν παρουσιάζουν άμεσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, αλλά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές που σχετίζονται με την αλυσίδα εφοδιασμού υδρογόνου. Οι επιπτώσεις στις πρώτες ύλες είναι πολύ μεταβλητές, είτε πρόκειται για ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές, είτε για αναμόρφωση φυσικού αερίου είτε για αεριοποίηση βιομάζας [93, 94]. Αυτό αποδεικνύεται στο **Σχήμα 1.7**, όπου τρεις εκτιμήσεις για τις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από κυψέλες καυσίμου H₂ παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα (από 113 έως 997 gCO₂eq./kWh), με τις χαμηλές εκπομπές που χρησιμοποιούν ηλεκτρόλυση, τις κεντρικές εκπομπές χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο με δέσμευση άνθρακα και αποθήκευσης (carbon capture and storage, CCS), και την υψηλότερη τιμή χρησιμοποιώντας αναμόρφωση φυσικού αερίου χωρίς CCS [18].

Ένα πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου είναι ότι παράγουν λίγο θόρυβο ή δονήσεις, ενώ τα θαλάσσια οικοσυστήματα επηρεάζονται επί του παρόντος από την εξαιρετικά ακουστική φύση της ναυτιλίας [95]. Οι αθόρυβοι ηλεκτροκινητήρες για πρόωση έχουν υψηλή απόδοση (~95%) και όταν συνδυάζονται με 45% αποδοτικές κυψέλες καυσίμου δείχνουν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης [95]. Μια γεννήτρια ντίζελ και ένας στρόβιλος αερίου απαιτούν 44% περισσότερο καύσιμο από μια κυψέλη καυσίμου με την ίδια ισχύ εξόδου [96].

Υπάρχουν σχετικά λίγα πλοία κυψελών καυσίμου υδρογόνου σε λειτουργία σήμερα, με το DNV GL να καταγράφει 23 έργα αποστολής κυψελών καυσίμου σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης το 2017 [97]. Το πρώτο πολιτικό πλοίο που χρησιμοποίησε την τεχνολογία κυψελών καυσίμου για συμπληρωματική πρόωση ήταν το *Viking Lady*. Η κύρια πρόωση παρέχεται από LNG σε κινητήρα ντίζελ, με κυψέλη καυσίμου που λειτουργούσε με υδρογόνο ή μεθανόλη (με αναδιαμόρφωση). Αυτό το σύστημα μείωσε το SO_x κατά 100%, το NO_x κατά 85% και το CO₂ κατά 20% [98]. Το «ZemShip» (Zero Emission Ship) *FCS Alsterwasser*, ένα πλοίο με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου με έδρα το λιμάνι του Αμβούργου, έχει χωρητικότητα 100 επιβατών και ισχύ 100 kW για λειτουργία σε ποτάμια και μικρές πλωτές οδούς [99].

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι τυπικά ως συμπιεσμένο αέριο (έως 700 bar), ως υγρό (κρυογόνο) ή σε στερεή κατάσταση (υδρίδια μετάλλων) [95]. Οι μεγάλοι όγκοι αποθήκευσης μπορεί να αποτελέσουν εμπόδιο στην υλοποίηση, ιδίως για ανακατασκευές. Ο Πίνακας 1.2 δείχνει τον όγκο φορτίου και τις επιπτώσεις μάζας για υδρογόνο έναντι HFO και LNG: το υγρό υδρογόνο απαιτεί 8 φορές περισσότερο όγκο αποθήκευσης από το HFO και 30 φορές περισσότερο για συμπιεσμένο υδρογόνο. Το υδρογόνο θα μπορούσε επίσης να αποθηκευτεί ως υγρή αμμωνία, η οποία δεν απαιτεί τόσο χαμηλές θερμοκρασίες (-33°C, βλ. -254°C για το υγρό υδρογόνο), δίνοντας μειωμένες απαιτήσεις ενέργειας [100]. Η αμμωνία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί απευθείας για πρόωση, είτε μέσω κινητήρα καύσης είτε σε κυψέλη καυσίμου [101]. Δεν έχουν ακόμη εμπορευματοποιηθεί τεχνολογίες για τη θαλάσσια λειτουργία, αν και ορισμένοι κινητήρες διπλού καυσίμου βρίσκονται υπό ανάπτυξη [102, 103].

Πίνακας 1.2. Όγκος φορτίου και επιπτώσεις μάζας για διαφορετικά καύσιμα, για πλοία με εμβέλεια 5,1 ημερών. Δεδομένα από [104, 105].

Fuel	HFO	LNG	Compressed hydrogen	Liquid hydrogen
Density (kg/m ³)	1010	470	23.7	72.4
Daily fuel use (m ³)	83	203	1186	522
Fuel mass for voyage (t)	421	485	140	140
Tank volume (m ³)	417	1195	12140	3120
Mass of tanks (t)	–	450	8584	972
Containers displaced	–	96	372	180
Volume displaced (m ³)	–	3700	14340	6939
Weight displaced (t)	–	1258	4878	3123

Η αποστολή φορτίου πρέπει να συμμορφώνεται με τον Διεθνή Κώδικα για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό Πλοίων που μεταφέρουν Υγροποιημένα Αέρια Μαζικά (Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, Κώδικας IGC), αλλά ο κώδικας IGC δεν επιτρέπει προς το παρόν τη μεταφορά υγρού υδρογόνου. Αλλαγές στον κώδικα αναπτύσσονται και τα φορτία που δεν καλύπτονται από τον κώδικα μπορούν να μεταφερθούν εάν υπάρξει συμφωνία μεταξύ των σχετικών εθνών [106]. Για παράδειγμα, η Αυστραλία και η Ιαπωνία υπέγραψαν πρόσφατα ένα μνημόνιο στην Αυστραλιανή Αρχή για τη Ναυτιλιακή Ασφάλεια (Australian Maritime Safety Authority, AMSA) το οποίο επιτρέπει την αποστολή χύδην υγρού υδρογόνου για πρώτη φορά [106].

Το απαγορευτικό κόστος κεφαλαίου για νέες υποδομές αποτελεί εμπόδιο στην παγκόσμια εμπορευματοποίηση. Ορισμένες υποδομές φυσικού αερίου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για υδρογόνο, το οποίο θα μπορούσε να μειώσει δραστικά το κεφαλαιακό κόστος, ιδιαίτερα σε χώρες με δίκτυο δικτύου φυσικού αερίου [107]. Το κόστος των καυσίμων υδρογόνου είναι υψηλότερο, πιθανώς κατά μια τάξη μεγέθους, από τα συμβατικά καύσιμα [104], αλλά αυτό το κενό θα πρέπει να μειωθεί καθώς οι ηλεκτρολυτές μειώνονται στο κόστος [108]. Οι εκτιμήσεις του κόστους λιανικής για το υδρογόνο κυμαίνονται από περίπου 0,06 έως 0,24 δολάρια ΗΠΑ/kWh περιεκτικότητα σε ενέργεια καυσίμου με μέσο όρο 0,12 δολάρια ΗΠΑ/kWh [109], αντικατοπτρίζοντας ένα ευρύ φάσμα πιθανών πρώτων υλών και διαδικασιών μετατροπής. Συγκριτικά, η εκτίμηση του 2017 για το MDO ήταν 0,04 USD/kWh

ενεργειακό περιεχόμενο (δεν περιλαμβάνονται οι απώλειες ενεργειακής απόδοσης όπως απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.6**). Έτσι, απαιτούνται ισχυρά κίνητρα για να ενθαρρυνθεί η πρόσληψη υδρογόνου.

Το κόστος εισαγωγής υδρογόνου θα μπορούσε να μειωθεί με την επιλογή μικρού αριθμού μεγάλων σκαφών που περιορίζονται σε διαδρομές από σημείο σε σημείο μεταξύ λιμένων υψηλής ανάπτυξης με τη διαθέσιμη υποδομή (π.χ. Ρότερνταμ και Τόκιο) ή σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή (π.χ. Βόρεια Θάλασσα) [110]. Ωστόσο, παρά τις δυνατότητες ορισμένων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου, η ζήτηση υψηλής ισχύος που απαιτείται για την προώθηση μεγάλων πλοίων δεν είναι ακόμη βιώσιμη με την τρέχουσα τεχνολογία κυψελών καυσίμου και έτσι δεν θα αντικαταστήσει τους υπάρχοντες κύριους κινητήρες πολλών μεγαβάτ μεγάλων πλοίων στο άμεσο μέλλον [111].

2.4.4. Ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης

Όπως και με την πρόωση στα πλοία κυψελών καυσίμου υδρογόνου, τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης (electric propulsion, EP) διαθέτουν έναν ηλεκτροκινητήρα που περιέχει μια αποθηκευμένη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας [89]. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθορίζονται από την πηγή της αποθηκευμένης ενέργειας, για παράδειγμα το αποθηκευμένο υδρογόνο ή η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από ορυκτά καύσιμα. Ανεξάρτητα από αυτό, η ανάπτυξη της απαιτούμενης υποδομής θα μπορούσε να αυξήσει την ευελιξία της βιομηχανίας, δημιουργώντας ένα δυνητικά χαμηλό μονοπάτι άνθρακα. Η εταιρεία «Norwegian Electric Systems» (NES) αναπτύσσει και ενσωματώνει αυτή τη στιγμή υβριδικούς κινητήρες και συστήματα EP [112]. Δύο από τα οχηματαγωγά πλοία της θα εκτελούν δρομολόγια με αυστηρές απαιτήσεις εκπομπών, όπως ορίστηκαν από τις Νορβηγικές Οδικές Αρχές, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη και την ανάπτυξη ενός συστήματος EP χρησιμοποιώντας φορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου [112]. Μέχρι σήμερα δεν βρέθηκαν οικονομικές εκτιμήσεις των πλοίων που χρησιμοποιούν ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, αλλά η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας θα ρυθμιστεί κυρίως από το κόστος μπαταριών, το οποίο μειώνεται γρήγορα [113], και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας ή καυσίμου που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση.

2.5. Κυψέλες καυσίμου

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου έχει μακρά ιστορία, που ξεκινά από τον 19ο αιώνα, αλλά εφαρμόστηκε για πρώτη φορά πρακτικά από τη NASA σε διαστημικές αποστολές από τη δεκαετία του 1960 και μετά. Η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για την Ανεξάρτητη Προώθηση Αέρα σε υποβρύχια. Από τη στροφή της χιλιετίας, η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου έχει ωριμάσει και χρησιμοποιείται σε εμπορική βάση σε ανυψωτικά, γεννήτριες / αδιάκοπη παροχή ρεύματος και συνδυασμένα συστήματα θερμότητας και ισχύος. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν προχωρήσει σε σχεδόν εμπορική χρήση για αυτοκίνητα, λεωφορεία, φορτηγά και σιδηροδρομικές εφαρμογές. Η τεχνολογία είναι υποψήφια για τον μακροπρόθεσμο απορρυπαντισμό της αεροπορίας. Η πιλοτική λειτουργία κυψελών καυσίμου για θαλάσσιες εφαρμογές έχει συνεχιστεί κατά την τελευταία δεκαετία, αλλά η χρήση κυψελών καυσίμου στη ναυτιλία είναι ακόμη στα σπάργανα. Οι κυψέλες καυσίμου σε συνδυασμό με εναλλακτικά καύσιμα όπως το υδρογόνο μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά και ακόμη και να εξαλείψουν τις εκπομπές και το θόρυβο, ενώ η ενεργειακή απόδοση μπορεί να αυξηθεί σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες καύσης. Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου έχουν άλλα πιθανά οφέλη, όπως μειωμένη συντήρηση, αρθρωτή και ευέλικτη σχεδίαση και βελτιωμένη απόδοση λειτουργίας μερικού φορτίου. Ωστόσο, οι κυψέλες καυσίμου έχουν σημαντικά μειονεκτήματα που σχετίζονται με το κόστος και την αντοχή. Αυτές οι προκλήσεις θα πρέπει να ξεπεραστούν πριν οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη συμμόρφωση με τις αυστηρότερες απαιτήσεις εκπομπών που εισάγονται για την απομάκρυνση του άνθρακα από τη ναυτιλία. Με απλά λόγια, ένα πακέτο ισχύος κυψέλης καυσίμου αποτελείται από το καύσιμο που παρέχεται από μια δεξαμενή αποθήκευσης καυσίμου, σύστημα επεξεργασίας αερίου και, μια στοίβα κυψελών καυσίμου που μετατρέπει τη χημική ενέργεια στο καύσιμο σε ηλεκτρική (και θερμότητα) μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων (Εικόνα 7.1). Η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια και επομένως το ενσωματωμένο σύστημα ισχύος πρέπει να σχεδιαστεί ανάλογα, επιτρέποντας τη χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

2.5.1. Τύποι κυψελών καυσίμου

Διατίθεται ποικιλία τύπων κυψελών καυσίμου και τα ονόματά τους αντικατοπτρίζουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην μεμβράνη των ηλεκτρολυτών. Οι ιδιότητες της μεμβράνης επηρεάζουν την επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, τη φύση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και τις απαιτήσεις καθαρότητας καυσίμου. Ανάλογα με τον τύπο των κυψελών καυσίμου, αναμένεται ηλεκτρική απόδοση 50-60%. Ορισμένοι τύποι κυψελών καυσίμου λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας την ανάκτηση θερμότητας που μπορεί να αυξήσει την ηλεκτρική απόδοση στο 70%. Ορισμένοι τύποι κυψελών καυσίμου μπορούν να λειτουργούν με διάφορα καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων επιλογών όπως LNG και μεθανόλης, καθώς και ισοδύναμα βιολογικής και ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό ισχύει κυρίως για τους τύπους κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, όπως στερεό οξείδιο (SOFC) και ανθρακικό άλας (MCFC). Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας όπως η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (LTPEMFC) χρειάζονται υδρογόνο ως καύσιμο, αλλά άλλα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εάν η μεταρρύθμιση αυτών αναπτυχθεί ανάντη της κυψέλης καυσίμου για την παραγωγή υδρογόνου το οποίο στη συνέχεια μπορεί να τροφοδοτηθεί στη στοίβα κυψελών καυσίμου. Η διαδικασία μεταρρύθμισης και καθαρισμού για κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν καύσιμα με υδρογόνου μειώνει τη συνολική απόδοση του συστήματος και, το σημαντικότερο, δεν συμβάλλει στην απορρόφηση άνθρακα εάν δεν απορροφηθεί το CO₂ από τη διαδικασία μεταρρύθμισης. Ο μεγάλος αριθμός σταδίων επεξεργασίας θα επηρεάσει επίσης την πυκνότητα ισχύος και τον παροδικό χρόνο απόκρισης του συνολικού συστήματος. Για αυτήν την τεχνολογία, η άμεση χρήση υδρογόνου προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση στο πλοίο.

2.5.2. Αξιολόγηση κυψελών καυσίμου για τη ναυτιλία

Η DNV έχει αξιολογήσει προηγουμένως επτά τεχνολογίες και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το SOFC, το LT-PEMFC και το κύτταρο PEM υψηλής θερμοκρασίας (HT-PEMFC), είναι τα πιο ελπιδοφόρα για θαλάσσια χρήση. Η ωριμότητα LT-PEMFC είναι υψηλή, ενώ μέτρια για τα HT-PEMFC και SOFC. Οι δοκιμές και η αξιολόγηση αυτών των τύπων κυψελών καυσίμου έχουν πραγματοποιηθεί σε έργα που

επικεντρώνονται ειδικά στη θαλάσσια χρήση. Η χρήση του MCFC έχει επίσης αποδειχθεί από θαλάσσια έργα. Το έργο FellowSHIP ήταν η πρώτη εγκατάσταση και επίδειξη μεγάλης κλίμακας κυψέλης καυσίμου σε εμπορικό σκάφος, το υπεράκτιο πλοίο ανεφοδιασμού Viking Lady. Το έργο, το οποίο περιελάμβανε εγκατάσταση συστήματος MCFC 320 kW που τροφοδοτείται από LNG, παρείχε βοηθητική ισχύ στο πλοίο, φτάνοντας συνολικά 18.500 ώρες λειτουργίας.

Οι κυψέλες καυσίμου με χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας είναι πιο ανεκτικές στις δυναμικές παραλλαγές φορτίου από τις κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας. Μικρότερες και μεσαίες εφαρμογές στο τμήμα μικρών αποστάσεων μπορεί να ευνοήσουν την τεχνολογία χαμηλής και μεσαίας θερμοκρασίας, όπως το LT-PEMFC και το HT-PEMFC. Τα σκάφη στο τμήμα μικρής θάλασσας είναι συνήθως μικρότερα, με πιο ποικίλα λειτουργικά προφίλ και μεγαλύτερο μερίδιο του χρόνου και της ενέργειας τους δαπανάται για σκοπούς άλλους εκτός από σταθερή πρόωση. Για αυτά τα πλοία, οι μικρότερες αποστάσεις και οι πολύ μεταβλητές απαιτήσεις ισχύος καθιστούν συχνά την ηλεκτρική και άμεση χρήση του H₂ ιδιαίτερα σημαντική. Αυτό αντικατοπτρίζεται από τα πρώτα οχηματαγωγά πλοία με υδρογόνο στον κόσμο, που σχεδιάζεται να τεθεί σε λειτουργία φέτος στη Νορβηγία.

Για εφαρμογή σε μεγαλύτερα πλοία βαθέων υδάτων, τα οποία μπορούν να φιλοξενήσουν πιο εύκολα λύσεις ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων, θα πρέπει να διερευνηθούν συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας όπως MCFC ή SOFC. Η θαλάσσια ναυσιπλοΐα περιλαμβάνει μεγάλα ωκεάνια πλοία και ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της ενεργειακής τους κατανάλωσης σχετίζεται με την πρόωση του πλοίου με σταθερή ταχύτητα σε μεγάλες αποστάσεις. Ο συνδυασμός εύκαμπτων κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας με μπαταρία (ή άλλες υβριδικές διαμορφώσεις) και λύσεις ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων για πλοία βαθέων υδάτων θα εξασφαλίσουν μια πιο ευέλικτη λειτουργία, θα μειώσουν τη θερμική επιβάρυνση των κυψελών καυσίμου και θα αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Για πλοία βαθέων υδάτων με υψηλή ενεργειακή ζήτηση και μεγάλα διαστήματα ανεφοδιασμού, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα καύσιμα χωρίς υδρογόνο με μεγαλύτερη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα, όπως αμμωνία, μεθάνιο και μεθανόλη. Η επίδειξη των πρώτων συστημάτων κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας με βάση την αμμωνία στον κόσμο θα είναι επίσης σημαντική για την ωρίμανση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, καθώς και για την εισαγωγή καυσίμων μηδενικού άνθρακα. Επιπλέον, θα πρέπει να εξεταστούν

εναλλακτικές ρυθμίσεις ανεφοδιασμού και αποθήκευσης υδρογονανθράκων, όπως οι υγροί φορείς υδρογόνου (LOHC).

2.5.3. Κόστος και εφαρμογή

Επί του παρόντος, το κόστος και η διάρκεια ζωής της στοίβας κυψελών καυσίμου είναι τα κύρια εμπόδια που εμποδίζουν την ενεργοποίηση κυψελών καυσίμου για θαλάσσιες εφαρμογές. Πρόσφατες βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις [195], [203] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι κυψέλες καυσίμων είναι επί του παρόντος πολλές φορές ακριβότερες από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αυτό οφείλεται στο σημαντικά υψηλότερο κόστος κεφαλαίου. Τούτου λεχθέντος, έχει αναφερθεί μείωση του κόστους σε σχέση με την αυξημένη χερσαία απορρόφηση ορισμένων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου και οι προβλέψεις υποδηλώνουν περαιτέρω περικοπές του κόστους λόγω της αναμενόμενης κλιμάκωσης και της μαζικής παραγωγής. Ο αυξημένος όγκος και το βάρος των θαλάσσιων κυψελών καυσίμου σε σύγκριση με τους κινητήρες ντίζελ ήταν ανταγωνιστικό μειονέκτημα. Αυτό επιδεινώνεται από το γεγονός ότι οι κυψέλες καυσίμου θα χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα τα οποία έχουν επίσης αυξημένο όγκο και βάρος σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Πρέπει να γίνει περισσότερη εργασία για την αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου που λειτουργούν σε διάφορα καύσιμα, και σύγκριση αυτών με τις συμβατικές λύσεις κινητήρων εσωτερικής καύσης. Μελέτες έχουν δείξει ότι το στάδιο κατασκευής έχει σχετικά μεγάλο αντίκτυπο και τα περιβαλλοντικά οφέλη εξαρτώνται από τη διάρκεια ζωής της στοίβας και την ανακυκλωσιμότητα της στοίβας [193, 204].

2.5.4. Προοπτική DNV

Η μελλοντική υιοθέτηση των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου είναι δύσκολο να προβλεφθεί λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας της αγοράς και των κανονιστικών ρυθμίσεων, καθώς και της αβεβαιότητας στην αναμενόμενη μείωση του επενδυτικού κόστους για την εγκατάσταση συστημάτων κυψελών καυσίμου σε πλοία. Η πιο ελπιδοφόρα θαλάσσια εφαρμογή βραχυπρόθεσμα αφορά τις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων όπως πλοία (π.χ. LT-PEMFC), καθώς και βοηθητικές

λύσεις/λύσεις λιμένων, όπου τα πλοία θα επωφεληθούν από μειωμένες τοπικές εκπομπές και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και από τη μείωση θορύβου και κραδασμών. Από τις βοηθητικές λύσεις/λιμενικές λύσεις, θα είναι επίσης δυνατή, τελικά, η κλιμάκωση έως και τις διαμορφώσεις υβριδικών κυψελών καυσίμου για ναυσιπλοΐα βαθέων υδάτων. Η χρήση κυψελών καυσίμου με LNG ως καύσιμο θα μπορούσε να είναι μια μελλοντική επιλογή για πλοία βαθέων υδάτων. Αυτό εξαρτάται από τη σημαντική μείωση του κόστους μονάδας των εγκατεστημένων κυψελών καυσίμου από τα σημερινά υψηλά επίπεδα, η οποία θα μπορούσε να επιτευχθεί καθώς η τεχνολογία ωριμάζει και η παραγωγή αυξάνεται. Πάνω. Η σταδιακή μετάβαση από τους συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης και η χρήση ορυκτών καυσίμων σε κυψέλες καυσίμου με μηδενικά και ουδέτερα καύσιμα άνθρακα θα βοηθήσει τη βιομηχανία να επιτύχει τις παγκόσμιες τροχιές στόχου των αερίων του θερμοκηπίου που έχουν καθοριστεί από τον IMO.

2.6. Τεχνολογικά – Λειτουργικά Μέτρα

Βελτιώσεις αποδοτικότητας σκάφους

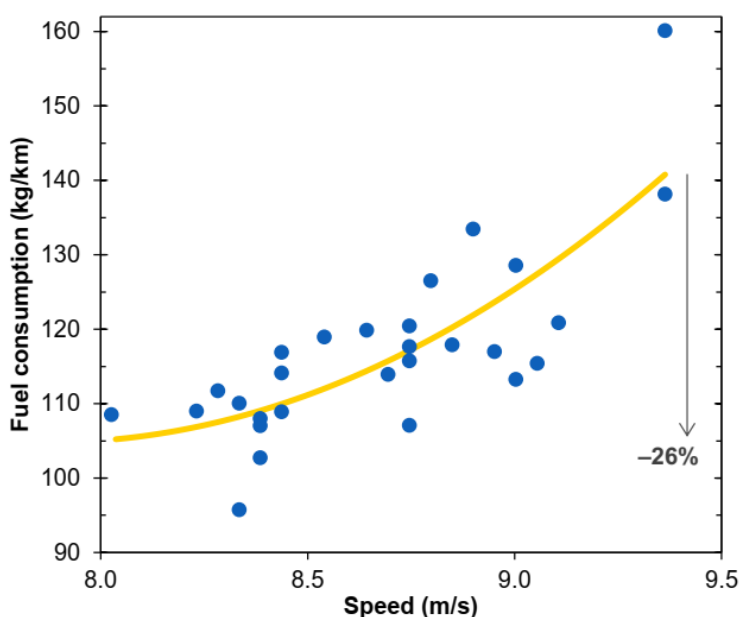
Αρκετές λειτουργικές και τεχνολογικές αλλαγές θα μπορούσαν να μειώσουν τις εκπομπές στη ναυτιλία (και τη χρήση καυσίμων) μέσω αυξημένης απόδοσης, όπως η χρήση αιολικής πρόωσης, αργός ατμός, επικαλύψεις κύτους χαμηλής αντίστασης και συστήματα ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων. Καθένα από αυτά περιγράφεται παρακάτω σε σχέση με το δυναμικό, το κόστος και τη δυνατότητα απαλλαγής από τον άνθρακα.

2.6.1. Αργός ατμός

Η πλήρης ταχύτητα για πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι συνήθως μεταξύ 23-25 κόμβων (44 χλμ./ώρα). Ο αργός ατμός ορίζεται ως 20-22 κόμβοι (39 χλμ./ώρα), επιπλέον αργός ως 17-19 κόμβοι (33 χλμ./ώρα) και υπερβολικά αργός ως 15 κόμβοι (28 χλμ./ώρα) [132]. Ο αργός ατμός επιμηκύνει τον χρόνο μετ' επιστροφής κατά 10-

20% ανάλογα με τη διαδρομή εξυπηρέτησης και τους χρόνους λιμένων [133], αλλά μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO₂ αυξάνοντας την απόδοση του σκάφους, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1.9** [132-135]. Μεγαλύτεροι χρόνοι μεταφοράς που σχετίζονται με χαμηλότερες ταχύτητες σημαίνει ότι απαιτούνται περισσότερα πλοία ή φορτία, γεγονός που μειώνει την εξοικονόμηση.

Ωστόσο, μια μείωση της ταχύτητας κατά 10% μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια συνολική μέση μείωση των εκπομπών κατά 19% [17]. Τα οφέλη από τον αργό ατμό ποικίλλουν σε διαφορετικούς τύπους πλοίων, μεγέθη, διαδρομές και τέλη [136]. Επιπλέον, ο αργός ατμός μεταβάλλει τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, οι οποίες θα μπορούσαν να αυξήσουν τη ρύπανση και τη διάβρωση λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας και της κακής καύσης [134, 135]. Η αποστράγγιση της γάστρας επηρεάζει επίσης την οπισθέλκουσα του σκάφους που και πάλι θα αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου.



Σχήμα 1.9. Κατανάλωση καυσίμου των θαλάσσιων σκαφών έναντι της μέσης ταχύτητας. Στοιχεία από [133].

Στη μελέτη [137] εκτιμάται ότι ο αργός ατμός μείωσε τις εκπομπές κατά 11% από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ 2008 και 2010. Η μεγαλύτερη μείωση αφορούσε σκάφη σε μεγάλους εμπορικούς δρόμους (πολυεμπόριο και Ευρώπη/Απω Ανατολή), σε αντίθεση με μικρότερες συναλλαγές όπως οι συναλλαγές που σχετίζονται με την Αυστραλία/Ωκεανία, οι οποίες υπόκεινται σε λιγότερο αργό ατμό [137]. Ο IMO

προτείνει ότι τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα δεξαμενόπλοια και τα φορτηγά χύδην μείωσαν τη συγκεκριμένη κατανάλωση καυσίμου κατά 30% μεταξύ του 2007 και του 2012 μέσω βραδείας ατμού [29].

Καθώς οι αποστολές και οι μεταφορές μετακινούνται στην παράδοση «έγκαιρα», ο αργός ατμός μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία του προγραμματισμού, καθώς τα σκάφη μπορούν να επιταχύνουν για να αναπληρώσουν χρόνο αν χρειαστεί. Ο αργός ατμός θα μπορούσε επίσης να απορροφήσει την πλεονάζουσα χωρητικότητα του στόλου σε περιόδους χαλαρής ζήτησης: το 2010, για παράδειγμα, το 40% της δυνητικά πλεονάζουσας χωρητικότητας απορροφήθηκε από τον αργό ατμό [134].

Το κόστος των καυσίμων παρέχει ένα σημαντικό κίνητρο για επιβράδυνση του ατμού, αντιπροσωπεύοντας έως και το 50% του συνολικού λειτουργικού κόστους και αναμένεται να αυξηθεί με την εισαγωγή πολιτικών που σχετίζονται με το κλίμα [138]. Ωστόσο, ενώ ο αργός ατμός για πλοία με ορυκτά καύσιμα μπορεί να μειώσει το κόστος, τα οφέλη δεν είναι απαραίτητα αισθητά από τους ιδιοκτήτες φορτίου, εκτός εάν αυτά τα χαμηλότερα κόστη καυσίμου μεταφράζονται σε χαμηλότερα ναύλα [139].

Έτσι, ο αργός ατμός μπορεί να απαιτεί ρύθμιση ή κίνητρο [137]. Ένας ρυθμισμένος παγκόσμιος περιορισμός ταχύτητας θα μείωνε σημαντικά τις εκπομπές, αλλά μπορεί να είναι αντιδημοφιλής [136], δύσκολο να επιτευχθεί [134, 140] και μπορεί ακόμη και να αποφέρει στρεβλά αποτελέσματα [137]. Οι μειώσεις ταχύτητας μέσω κινητήρων υποβάθμισης καλύπτονται μέσω του EEDI [141] και μπορεί να είναι μια επιλογή εάν αυξηθούν οι στόχοι μείωσης των εκπομπών στο μέλλον. Μια εισφορά αποθήκης ή ένας ευρύτερος μηχανισμός που βασίζεται στην αγορά μπορεί να είναι πιο κατάλληλος για να δώσει ευελιξία στον κλάδο στην επίτευξη μειώσεων συγκεκριμένων για κάθε περίπτωση [136, 140].

2.6.2. Χρώματα και επιχρίσματα κύτους

Η ομαλή γάστρα είναι σημαντική για αποτελεσματική λειτουργία και ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου. Τα βακτήρια που είναι προσκολλημένα στην υποβρύχια επιφάνεια των πλοίων προσελκύουν μεγαλύτερους οργανισμούς, όπως φύκια, δίθυρα και μύδια (βλέπε **Σχήμα 1.10**). Αυτές αυξάνουν το συντελεστή οπισθέλκουσας ενός πλοίου, επιβραδύνοντάς το και αυξάνοντας την κατανάλωση καυσίμου [142-144]. Η λάσπη μπορεί να προσθέσει 1-2% στο σύρσιμο, τα ζιζάνια προσθέτουν έως και 10%

και η πιο βαριά ρύπανση μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου κατά 40-50% [144-146]. Η μέση τραχύτητα επιφάνειας ενός τυπικού κύτους πλοίου αυξάνεται κατά 40 $\mu\text{m}/\text{έτος}$, που μεταφράζεται σε 1-1,2% ετησίως αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου [146].



Σχήμα 1.10. Κόστος αποστράγγισης κατά την προσάρτηση στο κύτος του πλοίου που προκαλεί σοβαρά προβλήματα στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αναπαράγεται με άδεια από την ομάδα Editec.

Τα χρώματα και η επένδυση του κύτους μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το συστατικό της τριβής της αντίστασης του δέρματος και επενδύεται σημαντικό κεφάλαιο σε χρώματα κατά της ρύπανσης για να αποτραπεί η προσκόλληση βακτηρίων στο κύτος [147, 148]. Αυτά έχουν αντιδιαβρωτικές και αντιρρυπαντικές ιδιότητες για προστασία από θαλασσινό νερό και θαλάσσιους οργανισμούς [149] και έχουν χρησιμοποιηθεί για πολλές δεκαετίες [142, 144].

Οι θαλάσσιες επιστρώσεις με βάση κασσίτερο χρησιμοποιήθηκαν ευρέως τη δεκαετία 1960-1970 που περιείχαν ενώσεις τριβουτυλοκασσιτέρου (TBT) που ήταν επιζήμιες για το περιβάλλον [142]. Η υποβάθμιση του TBT στο θαλάσσιο περιβάλλον προκαλεί πολυάριθμες επιπτώσεις, όπως η ενδοκρινική διαταραχή που οδηγεί σε σεξουαλικές διαταραχές, συμπεριλαμβανομένου του imposex σε σκύλους [121, 142, 148, 150], οδηγώντας στη διεθνή νομοθεσία που απαγορεύει τη χρήση τους [144, 151]. Μέχρι σήμερα δεν ήταν δυνατή η αντιστοίχιση των επιχρισμάτων TBT όσον αφορά την απόδοση, το κόστος και την ευκολία εφαρμογής, αλλά η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για να βρεθούν οικολογικά καλοήθειες εναλλακτικές λύσεις. Οι σύγχρονες

επικαλύψεις μπορούν να ταξινομηθούν σε γενικές γραμμές είτε με βάση βιοκτόνο [150]:

- Αδιάλυτη μήτρα (εποξική, πολυεστέρα, βινυλεστέρας).
- Διαλυτή μήτρα (αυτογυαλιστική, αφαιρετική, υβριδική).

ή χωρίς βιοκτόνο:

- Απελευθέρωση ρύπανσης (ελαστομερή σιλικόνης).
- Μηχανικός καθαρισμός (εποξικοί/βινυλεστέρες).

Τα βιοκτόνα αποτρέπουν την προσκόλληση και την ανάπτυξη, αλλά μπορεί να επηρεάσουν το περιβάλλον. Δυστυχώς, η απόδοση του βιοκτόνου είναι μεγαλύτερη όταν το πλοίο βρίσκεται σε ταξίδι και επομένως είναι λιγότερο ευάλωτο σε ρύπανση, προκαλώντας υπερβολική απώλεια βιοκτόνου [150]. Οι τεχνολογίες απελευθέρωσης σιλικόνης και ρύπανσης είναι ελκυστικές εναλλακτικές λύσεις χωρίς βιοκτόνα από περιβαλλοντική άποψη [150]. Αυτά τα χρώματα είναι αντικολλητικά για να αποφευχθεί η βιορύπανση αλλά είναι σχετικά ακριβά. Απουσιάζει επίσης η ανθεκτικότητα των συστημάτων που βασίζονται σε βιοκτόνα και είναι πιο δύσκολο να εφαρμοστούν [146]. Ωστόσο, λόγω του περιβαλλοντικού τους προφίλ, αυτές οι τεχνολογίες θα γίνουν όλο και πιο σημαντικές για τον έλεγχο της θαλάσσιας ρύπανσης.

2.6.3. Ανάκτηση θερμότητας αποβλήτων

Περίπου το ήμισυ της θερμικής ενέργειας που παράγεται από το ηλεκτρικό τρένο χάνεται ως θερμότητα περιβάλλοντος χωρίς να κάνει καμία χρήσιμη εργασία [152, 153]. Τα Συστήματα Ανάκτησης Θερμότητας Αποβλήτων (Waste Heat Recovery Systems, WHRS) μπορούν να μετατρέψουν τη θερμότητα από την εξάτμιση και το ψυκτικό σε χρήσιμη μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια [154], με εκτιμήσεις εξοικονόμησης καυσίμου στην περιοχή 4-16% [152, 153, 155]. Διάφορες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες με μια σειρά από αποτελεσματικότητες, ιδίως ο κύκλος του Steam Rankine, ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC) και ο κύκλος Kalina. Το ORC χρησιμοποιεί ένα οργανικό ρευστό για μετατροπή ενέργειας [153] και αποτελεί τη βάση των περισσότερων WHRS μικρής κλίμακας λόγω της απλότητας, της αποτελεσματικότητας σε χαμηλές θερμοκρασιακές διαφορές και του μέτριου κόστους [156]. Ο κύκλος Kalina χρησιμοποιεί ένα διάλυμα αμμωνίας και νερού, με διαφορετικά

σημεία βρασμού, για το υγρό εργασίας του. Αυτό επιτρέπει την εξαγωγή περισσότερης θερμότητας, αφού ο βρασμός συμβαίνει σε ένα εύρος θερμοκρασιών σε απόσταση [153]. Το WHRS αντιπροσωπεύει ένα επιπλέον κόστος κεφαλαίου, αλλά η εξοικονόμηση καυσίμου μπορεί να οδηγήσει σε περίοδο αποπληρωμής μικρότερη των 3 ετών [157], ενώ άλλες μελέτες υποδηλώνουν οικονομική αποδοτικότητα σε κινητήρες υγρών καυσίμων καθώς και κινητήρες φυσικού αερίου [158, 159]. Ωστόσο, τα συστήματα δεν μπορούν να εξοπλιστούν εκ νέου σε κάθε σκάφος, ακόμη και αν είναι εμπορικά βιώσιμα.

2.6.4. Επεξεργασία καυσαερίων

Η επεξεργασία καυσαερίων είναι μια άλλη επιλογή για την απαλλαγή άνθρακα, αν και σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης του CO₂. Οι καθαριστές NO_x και SO_x χρησιμοποιούνται ευρέως για πλοία που χρησιμοποιούν υπολειμματικά καύσιμα, ενώ συνεχίζεται η εργασία για την ανάπτυξη καταλυτών οξειδωσης μεθανίου [160-162]. Υπάρχουν πιθανές διαδρομές για τη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS) για τη μείωση των εκπομπών CO₂ από τα καυσαέρια. Ο σχεδιασμός Calix RECAST περιλαμβάνει τον καθαρισμό των καυσαερίων για να καταλάβει το 85-90% του CO₂ και τη χρήση της θερμότητας που παράγεται στην εξώθερμη αντίδραση για να παρέχει επιπλέον κινητήρια δύναμη και να αυξήσει την απόδοση καυσίμου [163]. Ένας ξηρός καθαριστής ασβέστη θα παρήγαγε αδρανή ασβεστόλιθο που θα μπορούσε να διασκορπιστεί στον ωκεανό. Οποιοδήποτε πλεόνασμα ασβέστη που απομένει θα αφαιρέσει επιπλέον άνθρακα από τους ωκεανούς μετατρέποντας σε όξινο ανθρακικό ασβέστιο, μειώνοντας έτσι την οξύτητα των ωκεανών [164, 165]. Ωστόσο, αυτό είναι πιθανό να είναι μια διαδικασία έντασης ενέργειας από την άποψη του κύκλου ζωής. Η παραγωγή ασβέστου με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα θα απαιτούσε μείωση των εκπομπών και όχι απλώς τη μεταφορά των εκπομπών από έναν τομέα στον άλλο [166, 167]. Το κόστος μπορεί να είναι σημαντικό και απαιτείται περισσότερη έρευνα για τις τοπικές επιπτώσεις του οικοσυστήματος από αυξημένο pH [168].

2.7.Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

2.7.1. Βοήθεια στον άνεμο

Η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται ευρέως μέσω συμβατικών πανιών και σύγχρονων εναλλακτικών λύσεων. Αυτά περιλαμβάνουν στροφείς Flettner, μαλακά πανιά, πτερύγια και ανεμογεννήτριες [121]. Δεν μπορούν να παράσχουν μόνοι τους τη συνολική ισχύ προώθησης ενός τυπικού πλοίου, αλλά καθώς οι ταχύτητες του ανέμου είναι γενικά οι υψηλότερες στην ανοικτή θάλασσα [122], επιτρέπουν μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμου διατηρώντας παράλληλα την πλήρη ταχύτητα [101, 123]. Η αιολική προώθηση είναι πιο αποτελεσματική σε χαμηλότερες ταχύτητες (π.χ. κάτω από 16 κόμβους) [124] και σε μικρότερα πλοία (3.000-10.000 τόνους) [125], τα οποία αντιπροσωπεύουν το ένα πέμπτο των παγκόσμιων φορτηγών πλοίων. Η συμβατότητα διαφορετικών σχεδίων ποικίλλει μεταξύ των κατηγοριών πλοίων λόγω πιθανών παρεμβολών στη μεταφορά φορτίου [121, 126].

Διάφορες μελέτες έχουν εκτιμήσει την εξοικονόμηση καυσίμου σε ένα ευρύ φάσμα: 2-24% για έναν μόνο ρότορα Flettner, 1-32% με ρυμούλκηση από χαρταετό [126], έως 25% για τα πανιά eConowind (που συσκευάζονται σε ένα μόνο δοχείο) [127] και μερικές εκτιμούν εξοικονόμηση από 10-60% σε αργές ταχύτητες [124]. Αρκετές ναυτιλιακές εταιρείες έχουν δοκιμάσει να προσθέσουν πανιά σε φορτηγά πλοία [128], αλλά η σταδιακή απορρόφηση δεν προβλέπεται μέχρι το 2025 λόγω της σχετικής ανωριμότητάς τους [121]. Επιπλέον, η μη εξοικείωση με την τεχνολογία, την ασφάλεια και την αξιοπιστία, καθώς και η έλλειψη επίδειξης αποτέλεσαν τα κύρια εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση σε έναν κλάδο σχετικά απαλλαγμένο από κινδύνους [129]. Δεν βρέθηκαν στοιχεία για το κόστος κεφαλαίου για την εγκατάσταση συστημάτων αιολικής βοήθειας καθώς βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, αλλά η πιθανή εξοικονόμηση καυσίμων είναι μεγάλη και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητας από άποψη κόστους υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και τύπους πλοίων.

2.7.2. Ηλιακή βοήθεια

Διάφοροι αερομεταφορείς δοκιμάζουν επίσης ηλιακή βοήθεια, συμπεριλαμβανομένων υβριδικών συστημάτων πανιών που χρησιμοποιούν τόσο τον άνεμο όσο και το φως του

ήλιου για να διατηρήσουν περιορισμένη περιοχή καταστρώματος. Παραδείγματα περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένα πανιά από SkySails, ένα φορτηγό πλοίο 3000 τόνων «μηδενικών εκπομπών» από την B9 Shipping και το υβριδικό φορτηγό UT Wind Challenger με εννέα ηλιακά πανιά [128], το EMP Aquarius [130] και το Nichioh Maru [101].

Η εφικτή ενέργεια θα ήταν αρκετή μόνο για να αυξήσει τις απαιτήσεις βοηθητικής ενέργειας [121, 131], ενώ η διάβρωση των ηλιακών συλλεκτών από το αλμυρό θαλάσσιο περιβάλλον θέτει επίσης ένα εμπόδιο. Η πιθανή μείωση του CO₂ που αναφέρεται σε διαφορετικές μελέτες για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας επί των πλοίων κυμαίνεται από 0,2-12% [16], ενώ τα υβριδικά συστήματα αιολικής και ηλιακής ενέργειας μπορεί να αυξήσουν την εξοικονόμηση καυσίμου σε 10-40% [128]. Όπως και με την αιολική βοήθεια, δεν βρέθηκαν στοιχεία κεφαλαίου ή κόστους λειτουργίας και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τον προσδιορισμό της πιθανής αποδοτικότητας κόστους.

2.7.3. Πυρηνική θαλάσσια πρόωση

Τα πυρηνικά καύσιμα προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος με χαμηλές και σταθερές τιμές καυσίμων, πολύ χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ποιότητας αέρα και δυνατότητα λειτουργίας για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανεφοδιασμό. Η πυρηνική πρόωση επιτυγχάνεται μέσω ενός μικρού πυρηνικού εργοστασίου που θερμαίνει νερό για να αυξήσει τον ατμό, ο οποίος κινεί ατμοστρόβιλους και ανεμογεννήτριες. Ενώ χρησιμοποιείται εκτενώς για στρατιωτικά πολεμικά πλοία και υποβρύχια, η ανάπτυξη ενός μη στρατιωτικού πυρηνικού στόλου αντιμετωπίζει πολλά εμπόδια με τη δημόσια και πολιτική αντίληψη, τη νομοθεσία και την εκπαίδευση και την ασφάλεια έναντι καταστροφικών ατυχημάτων, τρομοκρατίας και μη διάδοσης.

Το 2016, εκτιμήθηκε ότι λειτουργούν 166 ναυτικοί αντιδραστήρες: 85 ανήκουν στις ΗΠΑ, 48 στη Ρωσία και 33 στον υπόλοιπο κόσμο [114]. Μέχρι σήμερα υπήρχαν μόνο τέσσερα εμπορικά πυρηνικά σκάφη. Το ρωσικό Sevmojput είναι προς το παρόν το μόνο ενεργό [115]. Ωστόσο, αυτό το πλοίο αντιμετωπίζει περιορισμούς στα λιμάνια που μπορεί να επισκεφτεί, λόγω σχεδίων εκκένωσης πολιτών και φόβων στις αποβάθρες [116]. Η πρόσληψη στον εμπορικό τομέα θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει τεχνολογία μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (small modular reactor, SMR), μεγέθους

μερικών εκατοντάδων MW [117], αλλά να παραμείνει μια ιδέα πρώιμου σταδίου [118]. Ένα παράδειγμα είναι ο αντιδραστήρας 'RITM-200' για παγοθραυστικά όπως το NS Arktika, με επταετή κύκλο ανεφοδιασμού. Το κόστος, με δύο γεννήτριες ατμού 175 MW, είναι περίπου 1,9 δισεκατομμύρια δολάρια ανά σκάφος [117, 119].

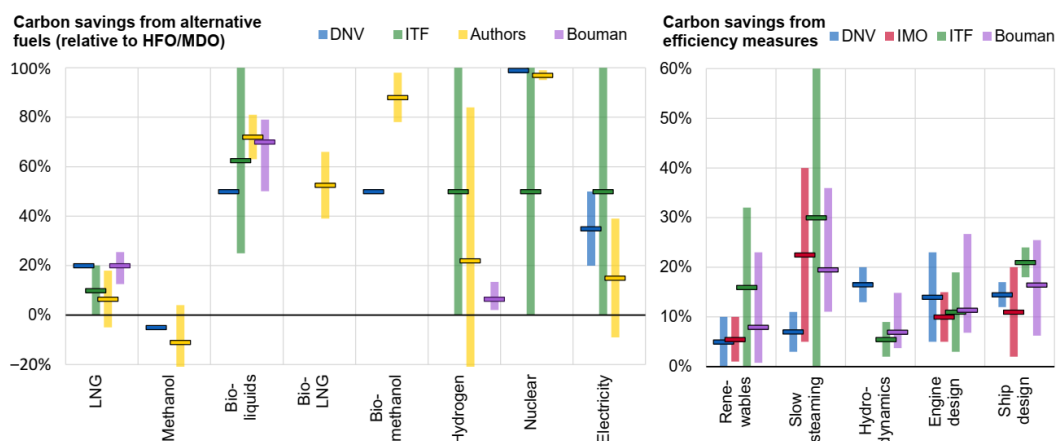
Ωστόσο, ο έλεγχος του πυρηνικού υλικού αποτελεί σημαντική ανησυχία για την ασφάλεια και τη γεωπολιτική. Υψηλά εμπλουτισμένο ουράνιο (30-90% U235) χρησιμοποιείται σε ρωσικούς ναυτικούς αντιδραστήρες και θα μπορούσε να μετατραπεί σε αυτοσχέδιο όπλο [114]. Οι προτάσεις για τον περιορισμό της χρήσης εξαιρετικά εμπλουτισμένου ουρανίου στον μη στρατιωτικό τομέα προχωρούν με την υποστήριξη του Διεθνούς Οργανισμού Ατομικής Ενέργειας [117], ενώ τα πυρηνικά πλοία άλλων χωρών έχουν χρησιμοποιήσει ουράνιο χαμηλού εμπλουτισμού.

Οι ανησυχίες για την ασφάλεια μπορεί να είναι ένα ανυπέρβλητο εμπόδιο για ευρύτερη υιοθέτηση. Υπάρχουν επτά αντιδραστήρες πυρηνικής ενέργειας στον πυθμένα του ωκεανού λόγω ναυτικών επεισοδίων και το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ έχει απελευθερώσει ραδιενεργό νερό [120]. Περαιτέρω προκλήσεις περιλαμβάνουν τη διανομή, τον έλεγχο και την παρακολούθηση των τεχνολογιών και των εξαρτημάτων που απαιτούνται για τους αντιδραστήρες, την παραγωγή καυσίμων και τον παροπλισμό [118]. Τα πυρηνικά πλοία που αποσύρονται εξακολουθούν να αποθηκεύονται στην επιφάνεια, υποδεικνύοντας ότι δεν έχει βρεθεί μόνιμη λύση [118]. Λόγω της αντίληψης του κοινού, της έλλειψης προηγούμενων και ελλείψεων σε νομοθετικά πλαίσια, εκπαιδευμένο προσωπικό και υποδομή, οι δυνατότητες μεγάλης κλίμακας ανάπτυξης πριν από το 2050 είναι χαμηλές.

2.8. Συνδυασμένη δυνατότητα απαλλαγής από τον άνθρακα

Οι προηγούμενες ενότητες περιέγραψαν την πληθώρα τεχνικών και επιχειρησιακών επιλογών για την απομάκρυνση του άνθρακα από τη διεθνή ναυτιλία, καθώς και αβεβαιότητες σχετικά με τις δυνατότητες του καθενός. Αυτό το τμήμα συνοψίζει τις δυνατότητες μετριασμού του άνθρακα και αποκαλύπτει την ευκαιρία συνδυασμών καυσίμων και μέτρων αποδοτικότητας να συμβάλουν στον στόχο του IMO για την απαλλαγή άνθρακα κατά 50%. Το **Σχήμα 1.11** συνοψίζει την εξοικονόμηση άνθρακα που προσφέρουν τα διαφορετικά καύσιμα σε σύγκριση με τα HFO και άλλες επιλογές

που μειώνουν τη συνολική κατανάλωση καυσίμου, βάσει έρευνας μελετών. Το σχήμα συνδυάζει αναλύσεις από τρεις εκθέσεις του κλάδου [16, 101, 169], τα προηγούμενα τμήματα αυτής της μελέτης και τη συστηματική ανασκόπηση από τους Bouman *et al.* [16].



Σχήμα 1.11. Εύρος μειώσεων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου μέσω της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων (αριστερό πλαίσιο) και από την ενσωμάτωση διαφόρων μέτρων αποδοτικότητας (δεξιός πίνακας). Εναλλακτικά καύσιμα παρουσιάζονται σε σχέση με τη χρήση συμβατικών ορυκτών υγρών καυσίμων, HFO και MDO. Οι φωτεινές ράβδοι αντιπροσωπεύουν το εύρος από κάθε μελέτη (1ο/3ο τεταρτημόριο από το Bouman, min/max διαφορετικά) και οι σκοτεινές οριζόντιες ράβδοι αντιπροσωπεύουν τη διάμεσο. Δεδομένα από [16, 101, 169].

Σε γενικές γραμμές, υπάρχει πολύ μεγαλύτερη διακύμανση στις εκτιμήσεις του GHG από την αλλαγή καυσίμου από ό, τι στα μέτρα απόδοσης, με εξαίρεση τον αργό ατμό. Ειδικότερα, οι υποτιθέμενες βαθύτερες επιλογές απαλλαγής από βιοκαύσιμα, υδρογόνο, πυρηνικά και ηλεκτρικά προωθητικά κυμαίνονται από σχεδόν πλήρη απαλλαγή άνθρακα έως αμελητέα διαφορά σε σύγκριση με το HFO. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στις διαφορετικές αλυσίδες εφοδιασμού πρώτων υλών που πρέπει να κατανοηθούν προσεκτικά προτού επισημανθούν με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Το LNG είναι πιθανό να προσφέρει μια σχετικά μέτρια βελτίωση σε σύγκριση με το HFO, που συνήθως οδηγεί σε μείωση κατά 10% των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά είναι αναμφισβήτητο η πιο βιώσιμη βραχυπρόθεσμη λύση για τη μείωση των εκπομπών CO₂ λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα κόστους και τη διαθέσιμη

υποδομή. Η συμβατική παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο συνεπάγεται συνεπώς αυξημένες εκπομπές σε σύγκριση με το HFO, υποδεικνύοντας ότι κάθε καύσιμο μεθανόλης πρέπει να προέρχεται από πηγές χαμηλών εκπομπών άνθρακα (π.χ. καταλυτική υδρογόνωση από ανανεώσιμο υδρογόνο) για να γίνει ενεργός φορέας απαλλαγής άνθρακα. Τα βιοκαύσιμα καύσιμα (βιο-LNG, βιο-μεθανόλη και βιο-ντίζελ) δίνουν ευρεία γκάμα δυνατοτήτων απαλλαγής από άνθρακα, αλλά συνήθως πάνω από 70% μείωση, ενώ η ενσωμάτωση LNG και τεχνολογίας βιοκαυσίμων (βιο-LNG) θα μπορούσε να προσφέρει έως και 90% σε μείωση του CO₂, υπό την προϋπόθεση ότι η αλυσίδα εφοδιασμού βιο-LNG παρουσιάζει χαμηλές περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις [170]. Επομένως, ενώ το κόστος υποδομής για την υλοποίηση του LNG μπορεί να είναι μεγάλο, η πρόσθετη ενσωμάτωση του βιο-LNG μπορεί να αντιπροσωπεύει μια ευχάριστη επιλογή τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά.

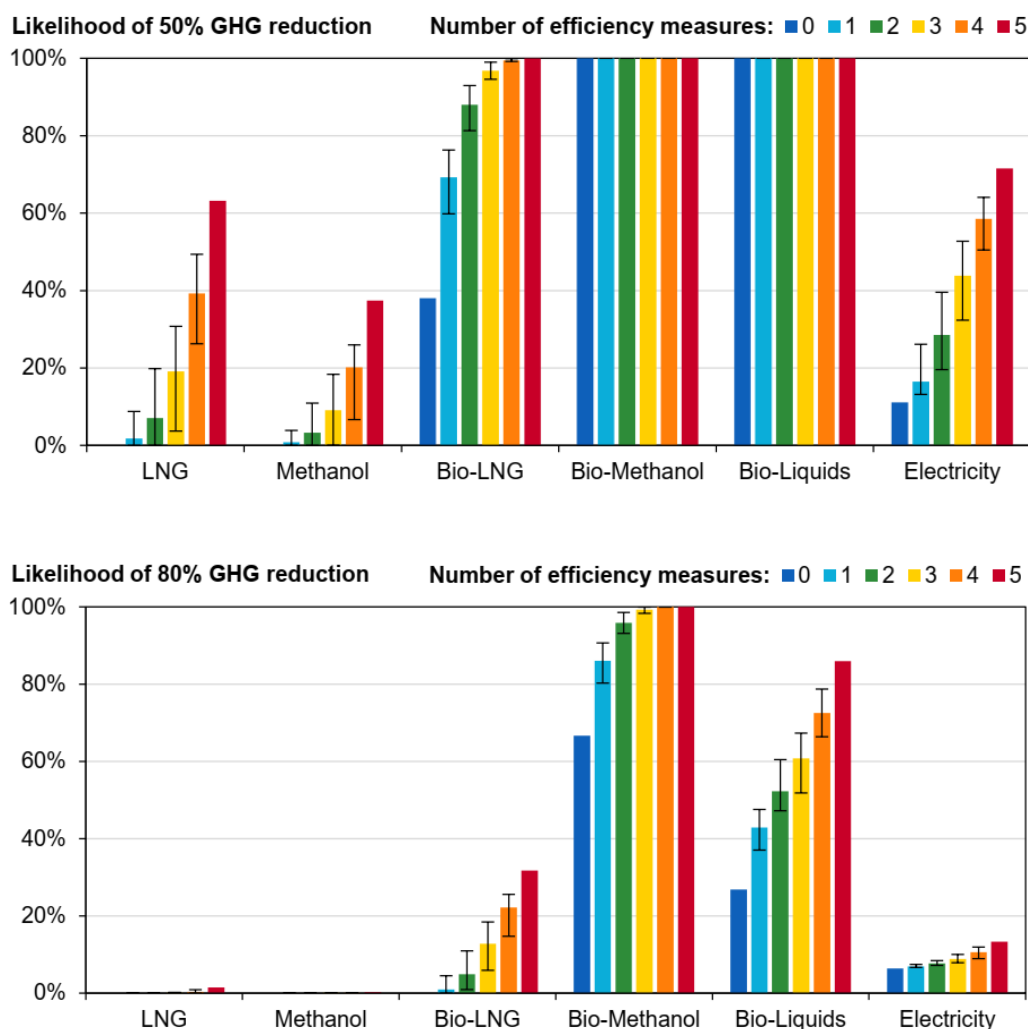
Αυτή η εργασία εκτιμά ότι τα πυρηνικά προκαλούν σχεδόν 100% απαλλαγή άνθρακα, ενώ η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο εξαρτάται από το μείγμα της περιφερειακής παραγωγής [101]. Η εκτίμηση αυτού του χαρτιού (κίτρινη ράβδος) βασίζεται στην αρχή ότι τα πλοία θα επαναφορτίζονται σε λιμάνια και έτσι υπολογίζει τη μέση ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας στα 100 μεγαλύτερα λιμάνια του κόσμου [171], σταθμίζοντας κάθε λιμάνι με τον όγκο αποστολής το 2015 [172]. Ο σταθμισμένος μέσος όρος είναι σήμερα 577 ± 199 gCO₂/kWh, αλλά αυτό θα μειωνόταν κατά 10% εάν αποκλείονταν η Κίνα.

Τα μέτρα βελτίωσης της αποδοτικότητας μπορούν να μειώσουν τις επιπτώσεις κατά μέσο όρο κατά 5-30%. Μέτρια κέρδη απόδοσης μπορεί να επιτευχθούν από κάθε επιλογή, αλλά η μεγαλύτερη συνεισφορά είναι μέσω αργής ροής (έως 60%) [29, 133, 137]. Πράγματι, έχει επισημανθεί ως ένα κρίσιμο βήμα για την επίτευξη μελλοντικών στόχων απαλλαγής από τον άνθρακα [24, 173]. Η ενσωμάτωση της αιολικής και ηλιακής βοήθειας (έως 32%) και οι βελτιώσεις στον σχεδιασμό των πλοίων (έως 24%) προσφέρουν επίσης σημαντικά οφέλη. Αξιοσημείωτο είναι ότι καμία από αυτές τις επιλογές δεν είναι αμοιβαία αποκλειστική, είτε σε αυτές τις επιλογές είτε σε συνδυασμό με τις επιλογές καυσίμου, επομένως τα οφέλη επιδεινώνονται εάν συνδυαστούν.

Για να εκτιμηθεί ο συνδυασμένος αντίκτυπος της αλλαγής καυσίμων και της εφαρμογής μέτρων αποδοτικότητας, αυτή η μελέτη χρησιμοποιεί τις εκτιμήσεις βελτίωσης που δίνονται στο **Σχήμα 1.11** μέσω προσομοίωσης του Μόντε Κάρλο για τον προσδιορισμό των σύνθετων πλεονεκτημάτων υπό διαφορετικούς συνδυασμούς μέτρων απορρόφησης άνθρακα. Οι μειώσεις εκπομπών από κάθε επιλογή καυσίμου και

απόδοσης απλοποιήθηκαν σε μια κανονική κατανομή με μέση και τυπική απόκλιση που προέκυψε από όλες τις μελέτες στο **Σχήμα 1.11**. Κάθε καύσιμο εξετάστηκε με συνδυασμούς των πέντε μέτρων απόδοσης που ταξινομούνται στο **Σχήμα 1.11**, δειγματοληπτικά σε όλες τις πιθανές μεταθέσεις.

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο **Σχήμα 1.12**, το οποίο δείχνει την πιθανότητα επίτευξης ενός στόχου μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% και 80% σε σύγκριση με το HFO με την εφαρμογή διαφορετικών καυσίμων σε συνδυασμό με διαφορετικά μέτρα απόδοσης (από μέτρα μηδενικής απόδοσης έως και τις πέντε κατηγορίες). Οι ράβδοι σφάλματος αντιπροσωπεύουν τις ελάχιστες και μέγιστες πιθανότητες από τις διαφορετικές μεταθέσεις επιλογών.



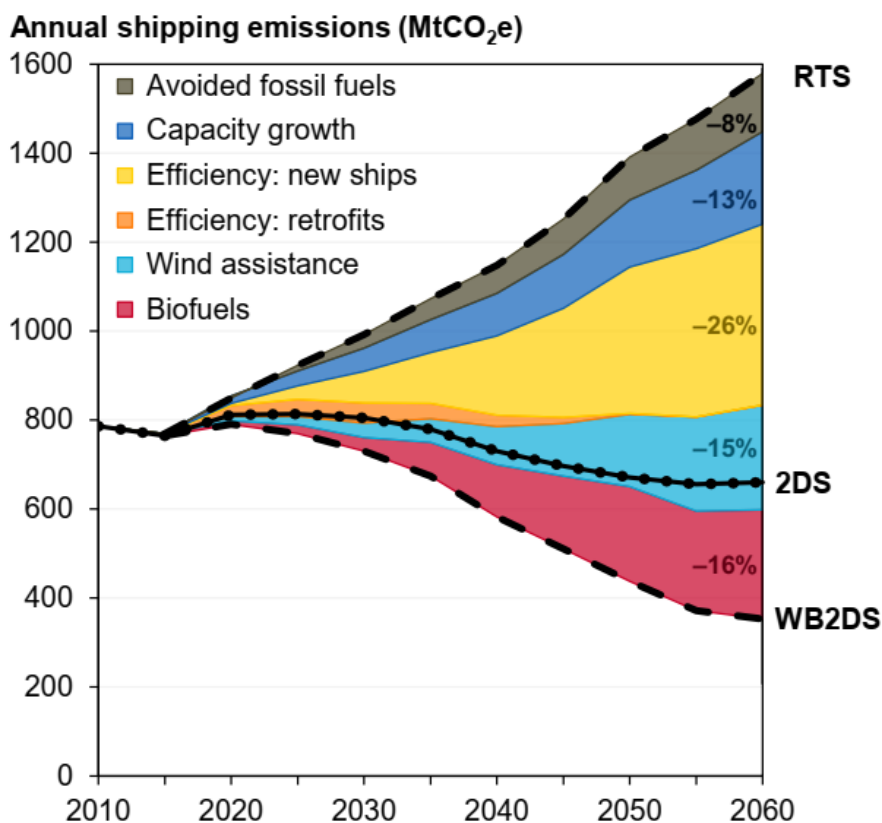
Σχήμα 1.12. Πιθανότητα επίτευξης του στόχου μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% (πάνω) και ενός ισχυρότερου στόχου 80% (κάτω) μέσω της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων παράλληλα με συνδυασμούς 5 διαφορετικών μέτρων

απόδοσης (υποβοηθούμενη προώθηση από ανανεώσιμες πηγές, αργός ατμός, υδροδυναμική, σχεδιασμός κινητήρα και σχεδιασμός πλοίου). [321]

Για να συμμορφωθούν τα πλοία με καύσιμο LNG με μείωση κατά 50% σε σχέση με το HFO, απαιτούνται ισχυρά μέτρα απόδοσης. Για να επιτευχθεί 50% πιθανότητα επίτευξης μειώσεων 50% με LNG, πρέπει να εφαρμοστούν όλες οι κατηγορίες απόδοσης. Τα βιοκαύσιμα καύσιμα απαιτούν μικρή βελτίωση της αποδοτικότητας για την επίτευξη του στόχου 50%, αν και η περιορισμένη διαθεσιμότητα βιο-πόρων ενδέχεται να ενθαρρύνει περαιτέρω τη λήψη μέτρων απόδοσης για τη μείωση της κατανάλωσης. Επιπλέον, για τις διαδρομές βιο-LNG, απαιτούνται μέτρα αποτελεσματικότητας για την επίτευξη των κλιματικών στόχων λόγω της πιθανής παρουσίας εκπομπών μεθανίου που έχουν ισχυρές κλιματικές επιπτώσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η εργασία δεν λαμβάνει υπόψη τη σχέση μεταξύ των μέτρων αποδοτικότητας. Ιδιαίτερα ο αντίκτυπος του αργού ατμού τόσο στην αιολική βοήθεια όσο και στην υδροδυναμική. Οι χαμηλότερες ταχύτητες των πλοίων οδηγούν σε βελτιωμένη συμβολή από την αιολική βοήθεια, η οποία συνθέτει παράλληλες βελτιώσεις. Ωστόσο, πιο αργές ταχύτητες μπορεί να μειώσουν τον αντίκτυπο ορισμένων υδροδυναμικών μέτρων, όπως οι επικαλύψεις του κύτους όπου οι υψηλότερες ταχύτητες βελτιώνουν την απόδοση. Περαιτέρω εργασίες για τη μοντελοποίηση βελτιώσεων πλοίων και καυσίμων θα χρησίμευαν για την καλύτερη κατανόηση των πολλαπλών διαδρομών βελτίωσης.

Οι συνδυασμένες βελτιώσεις καυσίμου και απόδοσης αποδεικνύονται ότι μπορούν να μειώσουν δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [16], κάτι που επιβεβαιώνεται από την εκτίμηση του ΔΟΕ για τη συμβολή στην απομάκρυνση των εκπομπών άνθρακα από τη διεθνή ναυτιλία από μια επιλογή μέτρων (Εικόνα 13) [174]. Η μελέτη υποδηλώνει ότι οι κύριοι συντελεστές είναι οι βελτιώσεις απόδοσης που αυξάνουν τη χωρητικότητα και τη χρήση του πλοίου, καθώς και μέσω του σχεδιασμού των σκαφών και του κινητήρα και των επιχειρησιακών μέτρων. Σε ολόκληρο τον διεθνή ναυτιλιακό στόλο η αιολική βοήθεια θα συνεισέφερε μόνο έως 15%, ενώ η μετάβαση του 50% του στόλου σε προηγμένα βιοκαύσιμα θα είχε ως αποτέλεσμα μείωση 16%.



Σχήμα 1.13. Δρόμος του ΙΕΑ για μείωση των παγκόσμιων εκπομπών ναυτιλίας κατά 50% έως το 2050, επισημαίνοντας τις τροχιές που αναμένονται στα σενάρια τους: Σενάριο τεχνολογίας αναφοράς, σενάριο δύο βαθμών (2DS) και πολύ κάτω από σενάριο δύο βαθμών (WB2DS). Η συμβολή των κύριων μέτρων απόδοσης και αλλαγής καυσίμου το 2060 εμφανίζεται ένθετα προς τα δεξιά. Δεδομένα από [174]

Εν κατακλείδι, συγκεκριμένα τεχνολογικά και επιχειρησιακά μέτρα που θα ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις απαλλαγής από τον άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας θα μπορούσαν να επιτευχθούν μέσω συνδυασμών διαφόρων οδών. Αυτό θα ήταν σίγουρα εφικτό με έναν νέο στόλο με παγκόσμιες υποστηρικτικές νομοθεσίες και πολιτικές, αλλά ο τρέχων στόλος μπορεί να απαιτεί δαπανηρούς μηχανισμούς αναδρομικής προσαρμογής για να επιτρέψει τις εν λόγω λύσεις. Τελικά, ένας συνδυασμός τεχνολογίας, καυσίμων και επιχειρησιακών μέτρων πρέπει να ενεργοποιηθεί με αποτελεσματικές, παγκόσμιες πολιτικές.

2.9. Τεχνολογίες για τη μείωση ρύπων στα υπάρχοντα καύσιμα: Επιχειρησιακά μέτρα/ Μέτρα που σχετίζονται με την αγορά

Πολιτικές απαλλαγής από τον άνθρακα

Δεδομένου ότι το EEDI και το SEEMP είναι πιθανό να έχουν ελάχιστο αντίκτυπο στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παράλληλα με την προβλεπόμενη βιομηχανική ανάπτυξη έως το 2050 [175], απαιτούνται ισχυρότερα μέτρα πολιτικής για την επίτευξη των αναδυόμενων στόχων άνθρακα. Οι δυνητικές πολιτικές περιλαμβάνουν ισχυρότερους στόχους απόδοσης, όρια ταχύτητας, πρότυπα καυσίμων ή ευρύτερους μηχανισμούς που βασίζονται στην αγορά [176]. Οι ευρείες επιλογές για την απαλλαγή από τον άνθρακα καλύπτονται στην ακόλουθη ενότητα, ακολουθούμενη από συζήτηση υφιστάμενων προτάσεων μηχανισμού και ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων αυτών των επιλογών.

2.9.1. Επιλογές πολιτικής για την απομάκρυνση της ναυτιλίας από άνθρακα

Οι επιλογές πολιτικής μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Η προσέγγιση ελέγχου των τιμών των εκπομπών, στην οποία ο συμμετέχων αντιδρά σε χρέωση ή διακύμανση της τιμής (που συνδέεται με τις εκπομπές) [177]. Αυτό περιλαμβάνει:

- α) περιβαλλοντικοί φόροι, τέλη ή τέλη,
- (β) χρεώσεις «καθ' οδόν» και
- (γ) περιβαλλοντικά διαφοροποιημένα τέλη λιμένων ή λιμανιών.

2. Η προσέγγιση ελέγχου των ποσοτήτων εκπομπών, όπου οι συμμετέχοντες τηρούν τα όρια εκπομπών ή το δικαίωμα εκπομπής και επιτρέπουν την εμπορία αυτών των "ποσοτήτων". Αυτό περιλαμβάνει:

- α) πιστωτικά προγράμματα,
- β) προγράμματα συγκριτικής αξιολόγησης και
- γ) προγράμματα ανώτατου ορίου και εμπορίου.

3. Επιδοτήσεις, όταν διατίθεται χρηματοδότηση για τα κατάλληλα μέτρα για την απαλλαγή από τον άνθρακα.

2.9.1.1. Έλεγχοι τιμών εκπομπών

Ο φόρος που επιβάλλεται για την αγορά καυσίμων στο σημείο πώλησης μπορεί να είναι μια αποτελεσματική οδός για τη μείωση των εκπομπών από τη ναυτιλία [25], όπου τα περιβαλλοντικά τέλη βασίζονται στην ποσότητα ή/και την ποιότητα του (των) ρύπου(-ων) [25, 178]. Η αμερικανική πολιτεία Ουάσινγκτον επέβαλε περιβαλλοντικό φόρο καυσίμων στα καύσιμα θαλάσσης για να ενθαρρύνει τη βελτίωση των πλωτών οδών της πολιτείας. Ωστόσο, υπάρχει κίνδυνος να αποτύχει αυτή η μέθοδος από την ευπάθειά της στην «διαρροή άνθρακα», η οποία ορίζεται ως η αύξηση των εκπομπών εκτός περιοχής ως άμεσο αποτέλεσμα μιας πολιτικής για τον περιορισμό των εκπομπών εντός της περιοχής [179]. Λαμβάνοντας καύσιμα από περιοχές εκτός των οποίων επιβάλλεται ο φόρος, ο χειριστής του πλοίου μπορεί να αποφύγει την καταβολή του φόρου [25, 180]. Σε αντίθεση με τα περιβαλλοντικά τέλη, μια τιμή που καθορίζεται "καθ' οδόν" θα καθοριστεί από τα ποσοστά εκπομπών, σε αντίθεση με τις ποσότητες καυσίμων. Αντανακλώντας στενά την πολιτική καθ' οδόν που έχει ήδη καθιερωθεί στον τομέα των αερομεταφορών εδώ και πολλά χρόνια, αυτή η προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί ιδιαίτερα στις θαλάσσιες μεταφορές.

2.9.1.2. Έλεγχοι ποσότητας εκπομπών

Τα προγράμματα συναλλαγών, που βασίζονται σε πίστωση, παρέχουν στους φορείς εκμετάλλευσης πιστώσεις για τη διαχείριση των εκπομπών τους ώστε να πληρούν ένα απαιτούμενο επίπεδο [177]. Αυτό μπορεί να είναι μια επέκταση των καθιερωμένων προγραμμάτων cap-and-trade, επιτρέποντας σε επιχειρήσεις από διαφορετικούς τομείς της αγοράς να ενταχθούν σε ένα υπάρχον πρόγραμμα συναλλαγών. Ωστόσο, οι πιστώσεις πρέπει να παρέχονται μόνο σε μέτρα που μειώνουν τις εκπομπές σημαντικά κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο και μπορεί να απαιτούν τακτική αξιολόγηση καθώς αλλάζουν οι τεχνολογίες, οι λειτουργίες και η αποτελεσματικότητα. Υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της δημιουργίας κινήτρων αρκετά υψηλών για να παρακινηθούν οι πλοιοκτήτες να συμμετάσχουν (δεδομένου ότι το πρόγραμμα είναι εθελοντικό) αλλά όχι τόσο υψηλό ώστε να χορηγηθούν πιστώσεις σε έργα με περιορισμένη πρόσθετη συμβολή στην απαλλαγή από τον άνθρακα.

Τα προγράμματα συναλλαγών συγκριτικής αξιολόγησης καθορίζουν ένα μέσο επίπεδο εκπομπών που δεν μπορεί να ξεπεραστεί [177]. Αυτά είναι συνήθως ευέλικτα στη φύση, όπου τέτοια συστήματα εγγενώς αντισταθμίζονται σε αντίθεση με την εξάλειψη των εκπομπών, επομένως είναι επιτακτική ανάγκη να τεθεί ένα κατάλληλο σημείο αναφοράς που θα επιτρέπει αποτελεσματικές συνολικές μειώσεις εκπομπών [25, 181]. Ένα πρόγραμμα ανώτατου ορίου και εμπορίου δημιουργεί ένα συνολικό συγκεντρωτικό ανώτατο όριο για τις εκπομπές. Τα δικαιώματα κατανέμονται στους εκπομπούς και μόλις οι ρυθμιστικές αρχές καθορίσουν ένα ανώτατο όριο, κάθε εκπομπός είναι ελεύθερος να εμπορεύεται. Παρόμοια με τα προγράμματα συγκριτικής αξιολόγησης, μπορεί να είναι πιο οικονομικά αποδοτικό για τους εκπομπούς να επενδύουν σε τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών αντί να αγοράζουν δικαιώματα.

2.9.1.3. Επιδοτήσεις

Οι επιδοτήσεις μπορούν να χορηγηθούν μέσω διαφόρων μηχανισμών για την παροχή άμεσης οικονομικής στήριξης στους κλάδους της βιομηχανίας είτε από την κυβέρνηση, είτε στην περίπτωση των ναυτιλιακών αρχών. Οι μηχανισμοί επιδότησης περιλαμβάνουν επιχορηγήσεις, δάνεια χαμηλού επιτοκίου, ευνοϊκή φορολογική μεταχείριση, συστήματα δημοπράτησης και άλλη οικονομική βοήθεια για προϊόντα με επιθυμητά περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά [182]. Για παράδειγμα, η Transport Canada προσφέρει επιδοτήσεις στο πλαίσιο του προγράμματος προώθησης τεχνολογίας εμπορευματικών μεταφορών, το οποίο στοχεύει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και ενθαρρύνοντας την χρήση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών [25]. Ένα άλλο παράδειγμα ήταν το λιμάνι του Αμβούργου, το οποίο για περιορισμένο χρονικό διάστημα προσέφερε δημόσιες εκπτώσεις σε λιμενικά τέλη προς πλοία που πληρούσαν ορισμένα κριτήρια εκπομπών [182].

2.9.2. Προτάσεις μηχανισμού που βασίζονται στην αγορά

Μέχρι το 2010, αρκετές προτάσεις από διάφορα κράτη μέλη είχαν υποβληθεί στην Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Maritime Environment Protection

Committee, MEPC), σύμφωνα με τις αρχές του IMO [183]. Η Νορβηγία συνέστησε ένα όριο σε επίπεδο τομέων για τις καθαρές εκπομπές από τη διεθνή ναυτιλία και ένα σύστημα συναλλαγών παράλληλα με αυτό, το οποίο πρότεινε να γίνουν εξαιρέσεις για τα ταξίδια στα αναπτυσσόμενα κράτη (Small Island Developing States, SIDS). Η Γαλλία έδωσε μια παρόμοια πρόταση, αλλά και στοχευμένο σχεδιασμό δημοπρασιών. Το Ηνωμένο Βασίλειο πρότεινε η πρόταση ETS να χρησιμοποιήσει μια προσέγγιση δύο φάσεων, με την αρχική φάση να αντισταθμίζει τις εκπομπές [184].

Σύμφωνα με το προτεινόμενο US Ship Efficiency and Credit Trading για το αμερικανικό εμπόριο αποδοτικότητας πλοίων και πίστωσης, αντί για ανώτατο όριο εκπομπών ή προσαύξηση καυσίμων, όλα τα πλοία θα υπόκεινται σε υποχρεωτικά πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, που επιβάλλονται μέσω προγράμματος εμπορικών συναλλαγών με πίστωση αποδοτικότητας [185]. Παρόμοια με το EEDI, θέτει πρότυπα απόδοσης τόσο για τα νέα όσο και για τα υπάρχοντα πλοία που παραμένουν δεσμευμένα για μείωση από την καθορισμένη βασική γραμμή [185]. Η Ιαπωνία και το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ναυτιλίας (World Shipping Council, WSC) έχουν προτείνει πρότυπα που στοχεύουν στην αποτελεσματικότητα σε αντίθεση με μια εισφορά ETS ή bunker που προτιμάται σε άλλες χώρες [138]. Το Σχέδιο Ενίσχυσης Ενέργειας (Energy Incentive Scheme, EIS) θέτει ένα πρότυπο που αντικατοπτρίζει επίσης τη βασική γραμμή EEDI και διαχειρίζεται συμπληρωματικό κόστος για τους πλοιοκτήτες, τους φορείς εκμετάλλευσης ή τους καταναλωτές σύμφωνα με την ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται για μη συμμόρφωση. Η Διεθνής Ένωση για τη Διατήρηση της Φύσης (International Union for Conservation of Nature, IUCN) προτείνει την αποζημίωση των αναπτυσσόμενων χωρών για τον δυνητικό οικονομικό αντίκτυπο ενός MBM μέσω επιλεξιμότητας για μηχανισμούς εκπτώσεων.

Από το 2010, η Ε.Ε. έχει νομοθετήσει ότι η ναυτιλία θα εισαχθεί στο EU-ETS έως το 2023, ελλείψει δράσης από τον IMO έως το 2021 [175]. Όλα τα πλοία που φτάνουν σε λιμένες της Ε.Ε. θα πρέπει να συμμορφώνονται με αυτήν τη νομοθεσία. Ίσως αυτή η ενέργεια παρέχει καταλύτη για ένα παγκόσμιο εφαρμοζόμενο ETS ναυτιλίας.

2.9.3. Αξιολόγηση των επιλογών πολιτικής

Αυτές οι βασικές επιλογές πολιτικής συζητούνται παρακάτω ως προς τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και συνοψίζονται στον **Πίνακα 1.3**.

Πίνακας 1.3. Τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών επιλογών πολιτικής για την απαλλαγή από τον άνθρακα στη ναυτιλία [187].

	Advantages	Disadvantages
Emissions price controls	<ul style="list-style-type: none">• Economic efficiency• Environmental efficiency¹	<ul style="list-style-type: none">• Carbon leakage• Cap on development• Displacement to air or road
Emissions quality controls	<ul style="list-style-type: none">• Flexibility• Economic efficiency	<ul style="list-style-type: none">• Transaction costs• Burden of additional costs on developing countries
Subsidies	<ul style="list-style-type: none">• Can be targeted	<ul style="list-style-type: none">• Requires careful implementation and oversight• Need for revision when conditions change

Ο φόρος άνθρακα αντιπροσωπεύει θεωρητικά υψηλή οικονομική και περιβαλλοντική αποδοτικότητα, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε ανώτατο όριο ανάπτυξης και δυνητικά μια στροφή από τις θαλάσσιες οδούς μεταφοράς υψηλότερων εκπομπών άνθρακα (αεροπορικές και οδικές). Ένα μειονέκτημα των προσεγγίσεων ελέγχου των τιμών είναι ο κίνδυνος διαρροής άνθρακα. Παρόλο που τα εθνικά κράτη μπορούν να ξεκινήσουν ένα φορολογικό σύστημα, ένα πλοίο παραμένει εδαφική προέκταση μιας χώρας της οποίας σημαία φέρει και υπό τη δικαιοδοσία της. Ωστόσο, τα πλοία είναι σε θέση να αλλάξουν αυτήν τη νομική δικαιοδοσία και να εγγραφούν σε σημαίες ευκολίας με καλύτερους φορολογικούς συντελεστές, χαμηλότερη συμμόρφωση με την ασφάλεια και δυνητικά μικρότερη ευθύνη έναντι της ρύθμισης του άνθρακα [187]. Για να αναιρέσουμε τις υπεκφυγές και τις στρεβλώσεις του ανταγωνισμού, είναι ζωτικής σημασίας να εφαρμοστούν παγκοσμίως τα μέτρα που βασίζονται στην αγορά για τις θαλάσσιες μεταφορές [188].

Ένας μηχανισμός ελέγχου ποσότητας όπως ένα ETS έχει δύο βασικά οφέλη. Πρώτον, η ευέλικτη φύση του επιτρέπει στο ανώτατο όριο να ποικίλει, αλλά δίνει βεβαιότητα σχετικά με τις επιτευχθείσες μειώσεις εκπομπών. Λόγω του εξαιρετικά κυκλικού χαρακτήρα της βιομηχανίας, η διακύμανση της ζήτησης δικαιωμάτων επηρεάζει την τιμή των εκπομπών, επομένως είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένα κατάλληλο ανώτατο όριο. Δεύτερον, μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικό σε

σύγκριση με τις εναλλακτικές λύσεις «χρέωσης», παράγοντας περιβαλλοντικό όφελος με τουλάχιστον κόστος.

Η ανάπτυξη ενός συστήματος εμπορίας θαλάσσιων εκπομπών (marine emission-trading scheme, METS) παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις. Μια πολιτική ανώτατων όρων και συναλλαγών μπορεί να φέρει αντιμέτωπους τους συμμετέχοντες και τις ρυθμιστικές αρχές με υψηλό κόστος συναλλαγών που σχετίζεται με τις συναλλαγές, την παρακολούθηση, την επιβολή και την επαλήθευση. Ο όγκος των δικαιωμάτων που διακινούνται μπορεί να είναι χαμηλότερος με υψηλότερο κόστος συναλλαγών, με αποτέλεσμα τη μη βέλτιστη διαπραγμάτευση [189]. Οι οικονομικές επιπτώσεις ενδέχεται να προσθέσουν μεγαλύτερη επιβάρυνση στις αναπτυσσόμενες χώρες από ό, τι στις ανεπτυγμένες χώρες. Ο μετριασμός αυτής της ανισότητας μπορεί να είναι η εφαρμογή μιας αρχής "κοινής αλλά διαφοροποιημένης ευθύνης" στον διεθνή ναυτιλιακό τομέα [23]. Αυτό μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση ενός συμφωνημένου μηχανισμού εκπτώσεων, στον οποίο οι αναπτυσσόμενες χώρες θα μπορούσαν να ανακτήσουν το κόστος.

Οι πιστώσεις είναι προ-πιστοποιημένες και εγκεκριμένες πριν κυκλοφορήσουν για διαπραγμάτευση, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του κινδύνου διαρροής άνθρακα μεταξύ των μελών. Άλλες μεταβλητές για παρακολούθηση περιλαμβάνουν τη θέση του πλοίου, τους παράγοντες εκπομπών, τη δραστηριότητα και την κατανάλωση ενέργειας. Οι ιδιοκτήτες πλοίων μπορούν να εξοικονομήσουν δικαιώματα όταν ο μετριασμός είναι φθηνότερος, για να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον όταν προκύψει υψηλό κόστος μείωσης, μετριάζοντας την επίδραση της αστάθειας των τιμών στο ETS. Ωστόσο, υπάρχει κίνδυνος ο δανεισμός έναντι πιστώσεων να έχει ως αποτέλεσμα οι εταιρείες να αντισταθμίσουν απλώς τις εκπομπές αντί να τις μειώσουν. Έτσι, εάν επρόκειτο να εφαρμοστεί ένα θαλάσσιο ETS, ο δανεισμός μπορεί να χρειαστεί να περιοριστεί από την ποσότητα ή τα χρονικά όρια [190].

Η παροχή άμεσης οικονομικής στήριξης μέσω επιδοτήσεων ήταν πολύ αποτελεσματική σε άλλους τομείς, μπορεί να κινηθεί γρήγορα και μπορεί να στοχεύσει σε τεχνολογίες ή παρεμβάσεις [191]. Επιπλέον, υπάρχουν αρκετά παραδείγματα επιδοτήσεων στον τομέα της ναυτιλίας που θα μπορούσαν να καθοδηγήσουν τη μελλοντική ανάπτυξη πολιτικής [177, 182]. Ωστόσο, οι επιδοτήσεις πρέπει να εφαρμόζονται και να παρακολουθούνται προσεκτικά και να αναθεωρούνται όπου αλλάζουν οι συνθήκες, όπως φαίνεται σε άλλους στοχευμένους μηχανισμούς στήριξης,

όπως τα τιμολόγια τροφοδοσίας στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [191].

Συμπερασματικά, υπάρχει μια ποικιλία επιλογών πολιτικής για την προώθηση της απαλλαγής από τον άνθρακα στον τομέα της ναυτιλίας. Ένα θαλάσσιο ETS έχει τη δυνατότητα να προσφέρει οικονομικά αποδοτικές μειώσεις εκπομπών, αλλά πρέπει να σχεδιαστεί ανάλογα με τις διαδικασίες ελέγχου. Ο ευέλικτος χαρακτήρας ενός METS θα επιτρέψει σε μεμονωμένους πλοιοκτήτες να εφαρμόσουν τα μέτρα που επιθυμούν σε αντίθεση με ένα φορολογικό καθεστώς. Για την αντιμετώπιση του κόστους κεφαλαίου των επιλογών μετριασμού, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν συστήματα επιδότησης όπως διαφοροποιημένα τέλη λιμένων και συστήματα κινήτρων για την επιτάχυνση της μετάβασης χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Το διοικητικό κόστος θα μπορούσε να επιβαρύνει άδικα ορισμένες χώρες, αλλά θα μπορούσε να προληφθεί με ένα σύστημα εκπτώσεων, όπου τα έσοδα από το ΣΕΔΕ αναδιανέμονται εν μέρει μεταξύ των αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και προς ταμεία για την κλιματική αλλαγή. Τέλος, η διαρροή άνθρακα κινδυνεύει να εξαλείψει τα πιθανά οφέλη του METS και απαιτεί αυστηρή ρύθμιση μέσω ανεξάρτητων εξωτερικών φορέων. Ωστόσο, ορισμένοι υποστήριζαν ότι η εφαρμογή ενός μηχανισμού με βάση την αγορά είναι απίθανη βραχυπρόθεσμα και πρέπει να εξεταστεί ως μακροπρόθεσμη επιλογή [23].

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

3.1. Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων

Μια απλή άποψη για την έννοια της λήψης αποφάσεων είναι ότι αποτελεί ένα πρόβλημα επιλογής μεταξύ πολλών εναλλακτικών λύσεων. Μια κάπως πιο εξελιγμένη άποψη περιλαμβάνει τη διαδικασία κατασκευής των εναλλακτικών λύσεων (δηλαδή, δεδομένης μιας δήλωσης προβλήματος, ανάπτυξης μιας λίστας επιλογών επιλογής). Μια πλήρης εικόνα περιλαμβάνει αναζήτηση ευκαιριών για αποφάσεις (δηλαδή ανακάλυψη ότι υπάρχει απόφαση που πρέπει να ληφθεί). Ένας διευθυντής μιας εταιρείας μπορεί να αντιμετωπίσει μια επιλογή στην οποία οι επιλογές είναι σαφείς (π.χ. η επιλογή ενός προμηθευτή μεταξύ όλων των υφιστάμενων προμηθευτών). Μπορεί επίσης να αντιμετωπίσει ένα σαφώς καθορισμένο πρόβλημα για το οποίο σχεδιάζει δημιουργικές επιλογές λήψης αποφάσεων (π.χ. πώς να εμπορευτεί ένα νέο προϊόν έτσι ώστε να μεγιστοποιηθούν τα κέρδη). Τέλος, μπορεί να εργάζεται με λιγότερο αντιδραστικό τρόπο και να αντιμετωπίζει τα προβλήματα λήψης αποφάσεων ως ευκαιρίες που πρέπει να ανακαλυφθούν μελετώντας τις δραστηριότητες της εταιρείας της και το περιβάλλον της (π.χ. πώς μπορεί να κάνει την παραγωγική διαδικασία πιο αποτελεσματική). Υπάρχουν πολλά εμπειρικά στοιχεία που αποδεικνύουν ότι η δομή των προβλημάτων λήψης αποφάσεων και ο εντοπισμός δημιουργικών εναλλακτικών αποφάσεων καθορίζουν την τελική ποιότητα των αποφάσεων. Τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων στοχεύουν κυρίως σε αυτόν τον ευρύτερο τύπο λήψης αποφάσεων και εκτός από την υποστήριξη επιλογών, βοηθούν στη μοντελοποίηση και ανάλυση συστημάτων (όπως σύνθετους οργανισμούς), στον εντοπισμό ευκαιριών λήψης αποφάσεων και στη διάρθρωση προβλημάτων απόφασης.

Έχει αποδειχθεί αρκετά πειστικά σε πολυάριθμες εμπειρικές μελέτες ότι η ανθρώπινη κρίση και λήψη αποφάσεων βασίζεται σε διαισθητικές στρατηγικές σε αντίθεση με θεωρητικά ορθούς κανόνες συλλογισμού. Αυτές οι διαισθητικές στρατηγικές, που αναφέρονται ως κριτικές ευρετικές στο πλαίσιο της λήψης αποφάσεων, μας βοηθούν στη μείωση του γνωστικού φορτίου, αλλά δυστυχώς σε βάρος της βέλτιστης λήψης αποφάσεων. Αποτελεσματικά, η απρόσκοπτη κρίση και επιλογή μας παρουσιάζουν συστηματικές παραβιάσεις αξιωμάτων πιθανότητας (αναφέρονται ως προκαταλήψεις). Εκτενής συζήτηση για τα σημαντικότερα

ερευνητικά αποτελέσματα μαζί με πειραματικά δεδομένα μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία, όπως στους Kahneman, Slovic και Tversky (1982). Ο Dawes (1988) παρέχει μια εισαγωγή σε ό,τι είναι γνωστό για τις επιδόσεις λήψης αποφάσεων των ανθρώπων.

Η υπεροχή ακόμη και των απλών γραμμικών μοντέλων έναντι της διαισθητικής κρίσης του ανθρώπου υποδηλώνει ότι ένας τρόπος βελτίωσης της ποιότητας των αποφάσεων είναι η αποσύνθεση ενός προβλήματος απόφασης σε απλούστερα στοιχεία που είναι καλά καθορισμένα και καλά κατανοητά. Η μελέτη ενός πολύπλοκου συστήματος που βασίζεται σε τέτοια στοιχεία μπορεί στη συνέχεια να βοηθηθεί από μια επίσημη, θεωρητικά ορθή τεχνική. Η διαδικασία αποσύνθεσης και επισημοποίησης ενός προβλήματος ονομάζεται συχνά μοντελοποίηση. Η μοντελοποίηση ισοδυναμεί με εύρεση μιας αφηρημένης αναπαράστασης ενός συστήματος του πραγματικού κόσμου που απλοποιεί και υποθέτει όσο το δυνατόν περισσότερο το σύστημα, και διατηρώντας τις βασικές σχέσεις του συστήματος, παραλείπει περιττές λεπτομέρειες. Η οικοδόμηση ενός μοντέλου ενός προβλήματος απόφασης, σε αντίθεση με τη συλλογιστική για ένα πρόβλημα με ολιστικό τρόπο, επιτρέπει την εφαρμογή επιστημονικής γνώσης που μπορεί να μεταφερθεί σε προβλήματα και συχνά σε τομείς. Επιτρέπει την ανάλυση, την εξήγηση και τη διαμάχη για ένα πρόβλημα απόφασης.

Η επιθυμία για βελτίωση της λήψης αποφάσεων από τον άνθρωπο παρείχε κίνητρο για την ανάπτυξη ποικίλων εργαλείων μοντελοποίησης σε κλάδους οικονομίας, επιχειρησιακής έρευνας, θεωρίας αποφάσεων, ανάλυσης αποφάσεων και στατιστικών. Σε καθένα από αυτά τα εργαλεία μοντελοποίησης, η γνώση για ένα σύστημα αντιπροσωπεύεται μέσω αλγεβρικών, λογικών ή στατιστικών μεταβλητών. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των μεταβλητών εκφράζονται με εξισώσεις ή λογικούς κανόνες, ενδεχομένως ενισχυμένους με ρητή αναπαράσταση της αβεβαιότητας. Όταν η λειτουργική μορφή μιας αλληλεπίδρασης είναι άγνωστη, μερικές φορές περιγράφεται με καθαρά πιθανολογικούς όρους. για παράδειγμα, με κατανομή πιθανότητας υπό όρους. Μόλις διατυπωθεί ένα μοντέλο, μια ποικιλία μαθηματικών μεθόδων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυσή του. Η λήψη αποφάσεων με βεβαιότητα έχει αντιμετωπιστεί με μεθόδους οικονομικής και επιχειρησιακής έρευνας, όπως ανάλυση ταμειακών ροών, ανάλυση ρευστότητας, ανάλυση σεναρίων, μαθηματικό προγραμματισμό, τεχνικές απογραφής και ποικίλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης για προγραμματισμό και εφοδιαστική. Η λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα ενισχύει τις παραπάνω μεθόδους με στατιστικές προσεγγίσεις, όπως ανάλυση αξιοπιστίας,

προσομοίωση και λήψη στατιστικών αποφάσεων. Οι περισσότερες από αυτές τις μεθόδους έχουν μετατραπεί σε προγράμματα σπουδών κολλεγίων και μπορούν να βρεθούν σε εγχειρίδια διαχείρισης. Λόγω περιορισμών χώρου, δεν θα συζητήσουμε περαιτέρω τα στοιχεία τους.

Ενώ μαθηματικά ένα μοντέλο αποτελείται από μεταβλητές και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, από την άποψη της λήψης αποφάσεων ένα μοντέλο και οι μεταβλητές του αντιπροσωπεύουν τα ακόλουθα τρία συστατικά: ένα μέτρο προτιμήσεων έναντι των στόχων απόφασης, διαθέσιμες επιλογές απόφασης και ένα μέτρο αβεβαιότητας σχετικά με τις μεταβλητές που επηρεάζουν την απόφαση και τα αποτελέσματα. Η προτίμηση θεωρείται ευρέως ως η πιο σημαντική έννοια στη λήψη αποφάσεων. Τα αποτελέσματα μιας διαδικασίας απόφασης δεν είναι όλα εξίσου ελκυστικά και είναι ζωτικής σημασίας για έναν υπεύθυνο λήψης αποφάσεων να εξετάσει αυτά τα αποτελέσματα ως προς την επιθυμητότητά τους. Οι προτιμήσεις μπορεί να είναι κανονικές (π.χ. προτιμάται περισσότερο εισόδημα έναντι λιγότερου εισοδήματος), αλλά είναι βολικό και συχνά απαραίτητο να τις αναπαριστάμε ως αριθμητικές ποσότητες, ειδικά αν το αποτέλεσμα της διαδικασίας απόφασης αποτελείται από πολλά χαρακτηριστικά που πρέπει να συγκριθούν σε μια κοινή κλίμακα.

Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (decision support system, DSS) είναι ένα μηχανογραφημένο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη κρίσεων και τρόπων δράσης σε έναν οργανισμό ή μια επιχείρηση, δηλαδή συλλέγει και αναλύει δεδομένα, συνθέτοντάς τα για την παραγωγή ολοκληρωμένων αναφορών πληροφοριών. Ένα DSS αναλύει τεράστιες ποσότητες δεδομένων, συγκεντρώνοντας ολοκληρωμένες πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων και τη λήψη αποφάσεων.

Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων διαφέρει από μια συνηθισμένη εφαρμογή λειτουργιών, η λειτουργία της οποίας είναι μόνο η συλλογή δεδομένων. Τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων επιτρέπουν πιο ενημερωμένη λήψη αποφάσεων, έγκαιρη επίλυση προβλημάτων και βελτιωμένη αποτελεσματικότητα στην αντιμετώπιση θεμάτων ή λειτουργιών, προγραμματισμού, ακόμη και διαχείρισης. Το DSS μπορεί είτε να είναι πλήρως μηχανογραφημένο είτε να τροφοδοτείται από ανθρώπους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να συνδυάσει και τα δύο. Τα ιδανικά συστήματα αναλύουν πληροφορίες και λαμβάνουν πραγματικά αποφάσεις για τον

χρήστη. Τουλάχιστον, επιτρέπουν στους χρήστες να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις με γρηγορότερο ρυθμό.

Το DSS μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τη διαχείριση επιχειρήσεων και άλλα τμήματα σχεδιασμού σε έναν οργανισμό για τη συλλογή πληροφοριών και δεδομένων και τη σύνθεσή τους σε ευφυή νοημοσύνη. Στην πραγματικότητα, αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως από τη διοίκηση μέσου έως ανώτερου επιπέδου. Για παράδειγμα, ένα DSS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προβολή εσόδων μιας εταιρείας κατά τους επόμενους έξι μήνες με βάση νέες υποθέσεις σχετικά με τις πωλήσεις προϊόντων. Λόγω ενός μεγάλου αριθμού παραγόντων που περιβάλλουν τα προβλεπόμενα στοιχεία εσόδων, αυτός δεν είναι ένας απλός υπολογισμός που μπορεί να γίνει χειροκίνητα. Ωστόσο, ένα DSS μπορεί να ενσωματώσει όλες τις πολλαπλές μεταβλητές και να δημιουργήσει ένα αποτέλεσμα και εναλλακτικά αποτελέσματα.

Ο πρωταρχικός σκοπός της χρήσης ενός DSS είναι η παρουσίαση πληροφοριών στον πελάτη με έναν ευνόητο τρόπο. Ένα σύστημα DSS είναι επωφελές επειδή μπορεί να προγραμματιστεί για τη δημιουργία πολλών τύπων αναφορών, όλα με βάση τις προδιαγραφές του χρήστη. Για παράδειγμα, το DSS μπορεί να παράγει πληροφορίες και να εξάγει τις πληροφορίες του γραφικά, όπως σε ένα γράφημα ράβδων που αντιπροσωπεύει τα προβλεπόμενα έσοδα ή ως γραπτή αναφορά. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να προοδεύει, η ανάλυση δεδομένων δεν περιορίζεται πλέον σε μεγάλους, ογκώδεις υπολογιστές. Δεδομένου ότι ένα DSS είναι ουσιαστικά μια εφαρμογή, μπορεί να φορτωθεί στα περισσότερα συστήματα υπολογιστών, είτε σε επιτραπέζιους υπολογιστές είτε σε φορητούς υπολογιστές. Ορισμένες εφαρμογές DSS είναι επίσης διαθέσιμες μέσω κινητών συσκευών. Η ευελιξία του DSS είναι εξαιρετικά επωφελής για τους χρήστες που ταξιδεύουν συχνά. Αυτό τους δίνει την ευκαιρία να είναι καλά ενημερωμένοι ανά πάσα στιγμή, παρέχοντας τη δυνατότητα να λαμβάνουν τις καλύτερες αποφάσεις για την εταιρεία και τους πελάτες τους εν κινήσει ή ακόμη και επιτόπου.

Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων βοηθούν στη λήψη πιο ενημερωμένων αποφάσεων. Συχνά χρησιμοποιούνται από ανώτερα και μεσαία επίπεδα διοίκησης, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων με δυνατότητα εφαρμογής ή για την παραγωγή πολλαπλών πιθανών αποτελεσμάτων με βάση τα τρέχοντα και ιστορικά δεδομένα της εταιρείας. Ταυτόχρονα, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν

για την παραγωγή αναφορών για πελάτες που είναι εύπεπτες και μπορούν να προσαρμοστούν με βάση τις προδιαγραφές του χρήστη.

3.2. Η πολυκριτηριακή ανάλυση

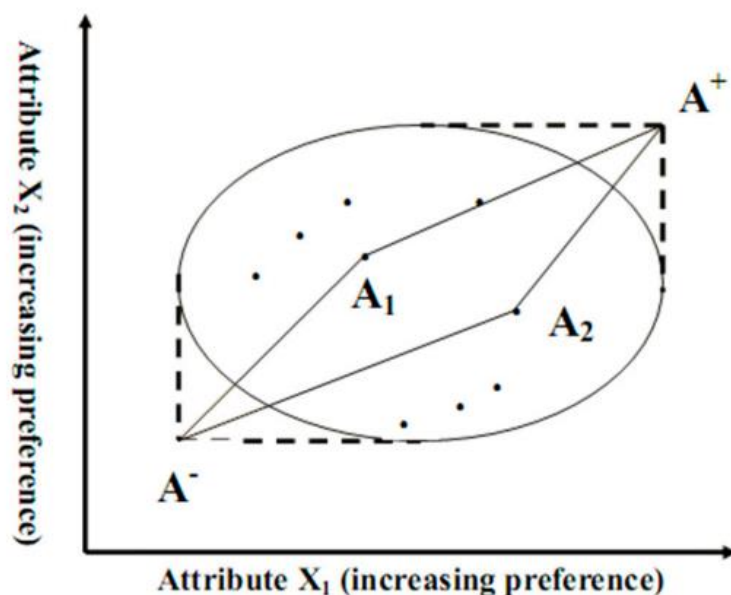
Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί τη συστηματική λογική και μαθηματική προσέγγιση που βοηθάει τους υπεύθυνους να επιλύσουν διλήμματα που προκύπτουν από την επιδίωξη πολλών και πιθανώς αντικρουόμενων στόχων και επιδιώξεων. Η επίλυση πολύπλοκων και ιδιαίτερα σημαντικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων πρέπει να πραγματοποιείται μέσω πολύπλευρης και πολυδιάστατης ανάλυσης. Η εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορεί να μην οδηγεί σε βέλτιστες λύσεις, αλλά διευκολύνει να ληφθούν ικανοποιητικές αποφάσεις, οι οποίες ανταποκρίνονται στη γενικότερη πολιτική που ακολουθεί ο υπεύθυνος για τη λήψη απόφασης. Επίσης, αυτή λαμβάνει υπόψη πολλαπλά κριτήρια, προσεγγίζοντας λύσεις που να εμφανίζουν τις καλύτερες επιδόσεις στην πλειονότητα των κριτηρίων ή που να ικανοποιούν τα περισσότερα εμπλεκόμενα μέρη.

Όσον αφορά την ιστορική εξέλιξη της πολυκριτηριακής μεθόδου, πρώτη αξιόλογη προσπάθεια επιστημονικής επίλυσης του προβλήματος της σύνθεσης πολλαπλών κριτηρίων ήταν αυτή εργασία του Pareto (1896), που έθεσε τις κατάλληλες αξιωματικές βάσεις, εισάγοντας, παράλληλα, μια εκ των πλέον βασικών εννοιών της σύγχρονης πολυκριτηριακής ανάλυσης, την έννοια της αποδοτικότητας (efficiency). Αργότερα, οι Von Neymann και Morgenstern (1944) αναπτύσσουν τη θεωρία της χρησιμότητας, η οποία αποτελεί τη βάση ενός από τα κυριότερα μεθοδολογικά ρεύματα. Μεταπολεμικά ο Koopmans (1951) επέκτεινε την έννοια της αποδοτικότητας του Pareto εισάγοντας την έννοια του αποδοτικού συνόλου, δηλαδή του συνόλου των εναλλακτικών δραστηριοτήτων οι οποίες δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη εναλλακτική δραστηριότητα. Στη δεκαετία του 1960 οι Charnes και Cooper (1961) συνέδεσαν τη θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού και της πολυκριτηριακής ανάλυσης (goal programming) και ο Fishburn (1965) επέκτεινε τη θεωρία της χρησιμότητας σε προβλήματα λήψης αποφάσεων υπό καθεστώς πολλαπλών κριτηρίων. Από τα τέλη της δεκαετίας του 1960, η πολυκριτηριακή ανάλυση απασχόλησε και τους Ευρωπαίους επιχειρησιακούς ερευνητές. Πρωτοπόρος ο Roy (1968), ο οποίος ανέπτυξε τη θεωρία των σχέσεων υπεροχής (outranking relations) και θεωρείται ο ιδρυτής της «Ευρωπαϊκής σχολής» της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Κατά τις επόμενες

δύο δεκαετίες (1970-1990), η πολυκριτηριακή ανάλυση αναπτύχθηκε ραγδαία σε θεωρητικό επίπεδο και σε θέματα πρακτικών εφαρμογών για την αντιμετώπιση διαφόρων πολύπλοκων πραγματικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Προς την κατεύθυνση αυτή σημαντική υπήρξε η συμβολή της πληροφορικής και των υπολογιστών.

3.3. Μέθοδος TOPSIS

Η λήψη πολλαπλών κριτηρίων λήψης αποφάσεων (multiple criteria decision-making, MCDM) θεωρείται ως ένα εξελιγμένο εργαλείο λήψης αποφάσεων που περιλαμβάνει τόσο ποσοτικούς, όσο και ποιοτικούς παράγοντες. Τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές και προσεγγίσεις MCDM προκειμένου να επιλεγούν οι πιθανές βέλτιστες επιλογές. Η μέθοδος TOPSIS αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1981 από τους Yoon και Hwang (1981). Η βασική του ιδέα είναι ότι η εναλλακτική λύση, που επιλέχθηκε, θα πρέπει να έχει τη μικρότερη απόσταση από την ιδανική λύση και την μεγαλύτερη από την αρνητική-ιδανική λύση (**Εικόνα 2.9.1**) [311, 312].



Εικόνα 2.9.1. Βασική έννοια της μεθόδου TOPSIS (A⁺: Ιδανικό σημείο, A⁻: Αρνητικό - Ιδανικό Σημείο).

Σύμφωνα με την προσέγγιση της Roszkowska (2011), η διαδικασία της κλασσικής TOPSIS μπορεί να εκφραστεί σε μια σειρά βημάτων:

Βήμα 1. Δημιουργία ενός πίνακα αποφάσεων $X = (x_{ij})$ με $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ να είναι η βαρύτητα του εκάστοτε κριτηρίου, με $x_{ij} \in R, w \in R$ και $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$. Τα κριτήρια της συνάρτησης μπορεί να είναι ποιοτικά (όσο μεγαλύτερο τόσο καλύτερο) και ποσοτικά (όσο λιγότερο τόσο καλύτερο).

Βήμα 2. Μετατροπή των διάφορων χαρακτηριστικών του πίνακα αποφάσεων σε μη μετρήσιμα χαρακτηριστικά ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των κριτηρίων. Επειδή πολλά κριτήρια έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης, οι τιμές στον πίνακα αποφάσεων πρέπει να μετατραπούν σε μία κανονικοποιημένη κλίμακα. Η κανονικοποίηση αυτή γίνεται μέσω των μεταβλητών n_{ij} :

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}$$

$$n_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} & \text{if } C_i \text{ is a benefit criterion} \\ \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} & \text{if } C_i \text{ is a cost criterion} \end{cases}$$

for $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$.

Βήμα 3: Υπολογισμός νέα μεταβλητής v_{ij} με βάση την προηγούμενη μεταβλητή λαμβάνοντας υπόψιν τη βαρύτητα του κάθε κριτηρίου.

$$v_{ij} = n_{ij} \cdot w_{ij} \quad \text{for } i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n.$$

Βήμα 4: Προσδιορισμός της θετικής και αρνητικής ιδανικής λύσης. Η ιδανική θετική λύση μεγιστοποιεί τα ποιοτικά κριτήρια και ελαχιστοποιεί τα ποσοτικά καθώς η ιδανική αρνητική λύση κάνει το ακριβώς αντίθετο.

Η ιδανική θετική λύση A^+ έχει την παρακάτω μορφή:

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = \left(\left(\max_i v_{ij} \mid j \in I \right), \left(\min_i v_{ij} \mid j \in J \right) \right).$$

Η ιδανική αρνητική λύση A^- έχει τη μορφή:

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = \left(\left(\min_i v_{ij} \mid j \in I \right), \left(\max_i v_{ij} \mid j \in J \right) \right).$$

όπου το I είναι συνδεδεμένο με τα ποιοτικά κριτήρια ενώ το J με τα ποσοτικά.

Βήμα 5: Υπολογισμός των μέτρων διαχωρισμού της ιδανικής θετικής λύσης από την αρνητική.

Ο διαχωρισμός κάθε εναλλακτικής από την ιδανική θετική λύση δίνεται από τον τύπο:

$$d_i^+ = \left(\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^p \right)^{1/p}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

$$d_i^- = \left(\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^p \right)^{1/p}, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

όπου $p = 2$.

Βήμα 6: Υπολογισμός της σχετικής εγγύτητας ως προς την ιδανική θετική λύση.

Η σχετική εγγύτητα της i -οστής εναλλακτικής A_j όσον αφορά την A^+ προσδιορίζεται από τη μεταβλητή R_i :

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}$$

όπου $0 \leq R_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, m$.

Βήμα 7: Ταξινόμηση των εναλλακτικών σεναρίων με φθίνουσα σειρά της μεταβλητής R_i .

3.4. Περιγραφή Μεθοδολογίας

Η συνεισφορά αυτής της εργασίας είναι να ενημερώσει τις οδούς για την επίτευξη μείωσης εκπομπής άνθρακα, να αναδείξει τους μηχανισμούς με τις μεγαλύτερες δυνατότητες μείωσης των εκπομπών και να εντοπίσει κρίσιμα ερευνητικά κενά.

Πιο αναλυτικά, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα σενάρια τα οποία και αξιολογήθηκαν σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια. Ο τελικός στόχος είναι η εύρεση

του σεναρίου που θα βοηθήσει την ναυτιλία να πετύχει τους στόχους που έχει θέσει ο IMO για το 2050.

Η εφαρμογή των συγκεκριμένων σεναρίων μέσω των αντίστοιχων κριτηρίων θεωρείται ότι γίνεται για όλους τους τύπους των πλοίων. Βέβαια, είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι αυτό αποτελεί ένα αρκετά ιδανικό μοντέλο καθώς οι ανάγκες, οι απαιτήσεις και η χρήση κάθε τύπου πλοίου είναι διαφορετικές, οπότε και χρήζουν διαφορετική, πιο ενδελεχή ανάλυση.

3.4.1. Γενικά Κριτήρια Επιλογής

Υπάρχουν δύο κριτήρια επιλογής για το πώς επιλέγουμε μια τεχνολογία. Το πρώτο είναι αν θα οδηγήσει σε μια παρατηρήσιμη μετατόπιση στο ενεργειακό σύστημα. Το μετράμε με βάση το πόσο γρήγορα αναπτύσσεται η τεχνολογία και αν το κόστος αναμένεται να μειωθεί τα επόμενα πέντε χρόνια. Πολλές από τις τεχνολογίες που περιγράφονται έχουν ήδη σημειώσει μεγάλες μειώσεις στο κόστος και θα διπλασιαστούν σε χωρητικότητα πολλές φορές τις επόμενες δεκαετίες. Έτσι, θα υπάρξουν παρατηρήσιμες μετατοπίσεις στο ενεργειακό σύστημα. Ο δεύτερος παράγοντας είναι πώς αλληλεπιδρούν οι τεχνολογίες μεταξύ τους, μερικές φορές αναφέρονται ως ζεύξη τομέων ή ολοκλήρωση ενεργειακής αλυσίδας. Η αλληλεπικαλυπτόμενη και συμπληρωματική φύση πολλών τεχνολογιών μπορεί να συνδυαστεί για να δημιουργήσει μια σταδιακή αλλαγή και να επιταχύνει τη δημιουργική καταστροφή των υφιστάμενων τεχνολογιών και να ανοίξει το δρόμο για την είσοδο κάτι καινούργιου. Οι τεχνολογίες που πληρούν αυτά τα κριτήρια καλύπτουν το ενεργειακό σύστημα: παραγωγή, μεταφορά και αποθήκευση ενέργειας και χρήση και μετατροπή της ενέργειας σε χρήσιμες υπηρεσίες. Η αλλαγή σταδίων τείνει να συμβαίνει όταν συνδυάζονται οι τεχνολογίες. Ο υπεράκτιος άνεμος μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο, αλλά διασυνδεδεμένος με ένα πλέγμα υπεράκτιου δικτύου, νέες ενσωματωμένες τεχνολογίες μπαταριών, συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα και παραγωγή πράσινου υδρογόνου, μπορεί να βελτιώσει την ευελιξία κατά μια τάξη μεγέθους και να επιταχύνει τη χρησιμότητα και την ανταγωνιστικότητα του συνόλου.

Για τομείς που είναι δύσκολο να μειωθούν, όπως η ναυτιλία, υπάρχουν περιορισμένες επιλογές για τη μείωση των εκπομπών, ενώ εξακολουθεί να εξυπηρετείται η παγκόσμια ζήτηση για αγαθά. Έτσι, νέες τεχνολογίες πρόωσης που

χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και πυρηνικά έχουν δυνατότητες. Η ανάπτυξη των θαλάσσιων τεχνολογιών σπάνια συμβαίνει χωρίς συμπληρωματική ανάπτυξη στην ξηρά. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου, πρέπει να δημιουργηθεί μια υποδομή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών και ολόκληρη η αλυσίδα αξίας τέτοιων τεχνολογιών θα χρειαστεί να ολοκληρωθεί. Για να αναπτυχθούν οι πυρηνικές τεχνολογίες, πρέπει να αναπτυχθούν επιτυχώς νέες και αναδυόμενες εξελίξεις στους Μικρούς Συσσωματωμένους Αντιδραστήρες στη στεριά, όπου η πρώτη τους πρόκληση θα είναι ο ανταγωνισμός με τη χερσαία ηλιακή φωτοβολταϊκή και αιολική ενέργεια. Όλες οι τεχνολογίες συνδέονται και αμφότερες ανταγωνίζονται και εξαρτώνται η μία από την άλλη.

Τα κριτήρια με τα οποία αξιολογήθηκαν τα παραπάνω σενάρια είναι ποιοτικά και ποσοτικά. Τα τελευταία αποτελούν κυρίως τα σενάρια που μπόρεσαν να ποσοτικοποιηθούν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Οι ποιοτικές μεταβλητές προέκυψαν από παρόμοιες μελέτες και βαθμονομήθηκαν ανάλογα με τη σημαντικότητα τους σύμφωνα με στοιχεία που προέκυψαν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Τα ποσοτικά κριτήρια που επιλέχθηκαν είναι το κόστος κάθε καυσίμου και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του κύκλου ζωής κάθε καυσίμου ανά kWh καθώς και τα ποσοστά εκπομπών μικροσωματιδίων και οξειδίων του αζώτου, του θείου σε σχέση με τα αντίστοιχα κατά τη χρήση ναυτιλιακού ντίζελ.

Τα ποιοτικά κριτήρια είναι το κατά πόσο μπορούν να συνεισφέρουν οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις, αν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για την παραγωγή του κάθε καυσίμου για να καλυφθούν οι ανάγκες της ναυτιλίας και το κατά πόσο έχουν ωριμάσει οι τεχνολογίες για την εφαρμογή του εκάστοτε καυσίμου.

Πρέπει, επίσης, να τονιστεί ότι όλα τα κριτήρια θεωρήθηκε ότι έχουν την ίδια βαρύτητα.

3.4.2. Μέθοδος επιλογής σεναρίων

Τα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι τα εναλλακτικά καύσιμα. Όπως το LNG που ήδη χρησιμοποιείται από πολλά πλοία, τη μεθανόλη που

έχει αρχίσει δειλά να διεισδύει στη ναυτιλία καθώς και καύσιμα που δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί πλήρως ως τεχνολογίες όπως τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο , για τα οποία έγινε ανάλυση στο κεφάλαιο 2. Η αμμωνία δεν αναλύθηκε καθώς εκτός από την ολίσθηση αμμωνίας (ammonia slip) υπάρχουν εκπομπές NOx, CO, υδρογονάνθρακες, N2O και ακόμη και αν φαίνεται πιθανό ότι αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν μετά την επεξεργασία τους, απαιτούνται περαιτέρω μελέτες [322].

Τεχνολογίες που δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως ακόμα και δεν είναι εύκολη η εφαρμογή τους για τα επόμενα χρόνια δεν συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη. Αυτό προέκυψε και από το γεγονός ότι δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία στη βιβλιογραφία σχετικά με την χρήση τους ως αυτούσια καύσιμα και όχι ως βοηθητικά μέσα πρόωσης. Τέτοια σενάρια αποτελούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αέρας, ήλιος), οι οποίες αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2.

Όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια, παρόλο που έχει αναπτυχθεί αρκετά σαν τεχνολογία και εφαρμόζεται ήδη στην πράξη σε ορισμένα πλοία, έχει μπει τροχοπέδη στην ευρεία εφαρμογή της καθώς προκύπτουν αρκετά σημαντικά ζητήματα. Πιο συγκεκριμένα, έχουν προκύψει πολιτικά ζητήματα καθώς και κοινωνικά αφού δεν υπάρχει αξιοπιστία από το κοινό.

Τέλος, αναφορικά με τα τεχνολογικά και λειτουργικά μέτρα, η μεμονωμένη χρήση τους μπορεί να επιφέρει μικρή μείωση στις εκπομπές καυσαερίων. Συνεπώς, συνίσταται η εφαρμογή τους συνδυαστικά με τα εναλλακτικά καύσιμα. Πληροφορίες για το συνδυασμό αυτόν δεν βρέθηκαν στη βιβλιογραφία οπότε και δεν συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

4.1. Εφαρμογή Μεθόδου TOPSIS

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 δημιουργήθηκε ο παρακάτω **πίνακας 4.1.1.** ώστε να εφαρμοστεί η μέθοδος TOPSIS για την εκλογή του πιο κατάλληλου καυσίμου για την επίτευξη του στόχου του IMO. Ο πίνακας αποτελείται από τις ποιοτικές και ποσοτικές μεταβλητές που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.

Πιο συγκεκριμένα, η τιμή των βιοκαυσίμων είναι διπλάσια των ορυκτών καυσίμων [81], με το κόστος των καυσίμων να διαφαίνεται στο σχήμα 1.6. Όσον αφορά τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, τα βιοκαύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους ίδιου κινητήρες με μικρές τροποποιήσεις και να χρησιμοποιήσουν τις ίδιες υποδομές αποθήκευσης, ανεφοδιασμού [79]. Σχετικά με τις εκπομπές CO₂ για αρχή έχει αξιοποιηθεί το σχήμα 1.8 [79, 82] με την τιμή που προκύπτει να είναι ένας μέσος όρος των εκπομπών των διαφόρων βιοκαυσίμων. Η χρήση τους μειώνει τα ποσοστά εκπομπών SO_x, PM κατά 97, 84-90 (87 κατά μέσο όρο) % αντίστοιχα [315, 316] ενώ αυξάνει κατά πολύ λίγο τις εκπομπές NO_x. Άρα εκπέμπεται το 3, 100, 13 % των αρχικών εκπομπών SO_x, NO_x, PM αντίστοιχα σε σχέση με τις εκπομπές του ναυτιλιακού πετρελαίου. Τέλος, προκύπτουν ζητήματα βιωσιμότητας που σχετίζονται με την παραγωγή μεγάλης κλίμακας.

Η τιμή της μεθανόλης παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6 ενώ οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο σχήμα 1.7. Οι εκπομπές SO_x, NO_x, PM μειώνονται κατά 99, 60 και 95% [91], άρα εκπέμπεται το 1, 40, 5% αντίστοιχα σε σχέση με το HFO. Μπορεί να εφαρμοστεί στους υπάρχοντες κινητήρες ως διπλό καύσιμο. Η παραγωγή της έχει σημαντικές εκπομπές αερίων που όμως μειώνονται αν γίνει μέσω φυσικού αερίου, το οποίο είναι ορυκτό καύσιμο χωρίς απεριόριστη διαθεσιμότητα.

Το υδρογόνο είναι ένα καύσιμο που μπορεί να παραχθεί χωρίς καθόλου εκπομπές επιβλαβών καυσαερίων. Δεν παράγονται εκπομπές SO_x, NO_x, PM κατά την καύση του, ενώ οι εκπομπές CO₂ του κύκλου ζωής του φαίνονται στο σχήμα 1.7. Επίσης, υπάρχει μικρή διαθεσιμότητα και χρειάζονται έξτρα υποδομές για την εφαρμογή του στη ναυτιλία [88]. Τέλος, το κόστος του είναι 0.12 \$/kWh [109].

Κλείνοντας, το LNG αποτελεί ένα καύσιμο που χρησιμοποιείται ήδη στα υπάρχοντα πλοία. Είναι ένα ορυκτό καύσιμο συνεπώς υπάρχει περιορισμένη

διαθεσιμότητα. Η τιμή του φαίνεται στο σχήμα 1.7. Οι εκπομπές SO_x, PM είναι μηδενικές ενώ το NO_x μειώνεται κατά 75-90% (περίπου 82% κατά μέσο όρο) και άρα εκπέμπεται 18% σε σχέση με το HFO.

	Κόστος (\$/kWh)	Emissions (gCO ₂ /kWh)	% SO _x	% NO _x	% PM	Availability	Available infrastructure	Technology maturity [314]
LNG	0.03	630	0	18	0	5 (F)	7 (MG)	9 (G)
Bio-fuels	0.16	210	3	100	13	3 (MP)	5 (F)	7 (MG)
Methanol	0.16	790	1	40	5	3 (MP)	5 (F)	3 (MP)
Hydrogen	0.12	680	0	0	0	1 (P)	1 (P)	3 (MP)
Electricity	-	0	0	0	0	7 (MG)	1 (P)	7 (MG)

Πίνακας 4.1.1. Πίνακας αποφάσεων μεθόδου TOPSIS

Σχετικά με την ηλεκτρική πρόωση, εάν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν εκπέμπονται καυσαέρια κατά την παραγωγή της. Επίσης οι εκπομπές επιβλαβών αερίων κατά τη χρήση της είναι μηδενικές. Ωστόσο, το κόστος των μπαταριών είναι πολύ μεγάλο όπως επίσης χρειάζεται και μεγάλος αποθηκευτικός χώρος. Γι' αυτό και δεν συμπεριλήφθηκε στη μέθοδο TOPSIS.

Ο κώδικας, που προέκυψε με βάση το κεφάλαιο 3 σε συνδυασμό με επιλογή ίδιας βαρύτητας για κάθε κριτήριο, με βάση τον οποίο εκτελέστηκε η μέθοδος TOPSIS παρατίθεται στο παράρτημα.

Όσον αφορά τις ποιοτικές μεταβλητές, βαθμονομήθηκαν με βάση τον πίνακα 4.1.2.:

Scale	Rating
Poor (P)	1
Medium poor (MP)	3
Fair (F)	5
Medium good (MG)	7
Good (G)	9
Intermediate values between the two adjacent judgments	2,4,6,8

Αρχικά δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας μεταβλητών για κανονικοποίηση των τιμών του πίνακα αποφάσεων. Οι τιμές μετατρέπονται στις μεταβλητές n_{ij} ώστε να μπορούν να συγκριθούν (ποιοτικές μεταβλητές και ποσοτικές με διαφορετικές μονάδες μέτρησης).

	Κόστος	CO2	SOx	NOx	PM	Available infrastructure	Availability	Technology maturity
LNG	0.1163	0.5097	0	0.1648	0	0.7538	0.7000	0.7398
Bio-fuels	0.6205	0.1699	0.9487	0.9158	0.9333	0.4523	0.5000	0.5754
Methanol	0.6205	0.6392	0.3162	0.3663	0.3590	0.4532	0.5000	0.2466
Hydrogen	0.4653	0.5502	0	0	0	0.1508	0.1000	0.2466

Πίνακας 4.1.3. Μεταβλητές κανονικοποίησης

Στη συνέχεια υπολογίζονται για κάθε κριτήριο η ιδανική θετική A^+ και αρνητική A^- λύση, που αποτυπώνουν για κάθε σενάριο την καλύτερη και τη χειρότερη μέθοδο (καύσιμο) αντίστοιχα.

	Κόστος	CO2	SOx	NOx	PM	Available infrastructure	Availability	Technology maturity
A^+	0.6205	0.6392	0.9487	0.9158	0.9333	0.7538	0.7000	0.7398
A^-	0.1163	0.1699	0	0	0	0.1508	0.1000	0.2466

Πίνακας 4.1.4. Ιδανική θετική και αρνητική λύση κριτηρίων

Έπειτα υπολογίζεται το μέτρο διαχωρισμού δείκτης εγγύτητας d_i^+, d_i^- της ιδανικής θετικής και αρνητικής λύσης:

	LNG	Bio-fuels	Methanol	Hydrogen
d_i^+	0.3777	1.7383	1.1007	1.1105
d_i^-	1.8902	0.7611	1.1326	1.6253

Πίνακας 4.1.5. Μέτρο διαχωρισμού ιδανικής θετικής και αρνητικής λύσης

Τέλος, βρίσκεται ο δείκτης εγγύτητας R_i του κάθε καυσίμου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 4.1.5.:

Καύσιμο	Δείκτης
LNG	0.8335
Bio-fuels	0.3045
Methanol	0.5071
Hydrogen	0.5941

Πίνακας 4.1.6. Δείκτης εγγύτητας R_i

4.2. Ανάλυση Ευαισθησίας Βαρύτητας Κριτηρίων

Τα προηγούμενα αποτελέσματα προήλθαν θεωρώντας ότι όλα τα κριτήρια έχουν ίση βαρύτητα. Τι γίνεται όμως όταν έχουν διαφορετική; Όταν κάποιο κριτήριο θεωρείται πιο σημαντικό από τα υπόλοιπα;

Με βάση την μέθοδο TOPSIS, όταν τα κριτήρια είναι ισοβαρή, ο δείκτης εγγύτητας R για κάθε καύσιμο είναι:

Καύσιμο	Δείκτης
LNG	0.8335
Bio-fuels	0.3045
Methanol	0.5071
Hydrogen	0.5941

Γενικά παρατηρείται ότι σε σχέση με τα περισσότερα κριτήρια που έχουν επιλεγεί, το LNG αποτελεί την πιο κατάλληλη επιλογή, όχι όμως μακροπρόθεσμα καθώς αποτελεί ορυκτό καύσιμο. Σε σχέση με τους στόχους του 2050, όπου θεωρείται περισσότερο σημαντική η μείωση των εκπομπών διαφόρων ρύπων από τα πλοία, τότε οι καλύτερες λύσεις φαίνονται να είναι υδρογόνο και μεθανόλη. Το LNG κερδίζει προς το παρόν, αλλά μακροπρόθεσμα φαίνεται να μην καλύπτει.

Τα βάρη των κριτηρίων εκφράζονται με βάση τις τιμές του παρακάτω πίνακα:

Scale	Weight
Very very low (VVL)	0,005
Very low (VL)	0,125
Low (L)	0,175
Medium low (ML)	0,225
Medium (M)	0,275
Medium hight (MH)	0,325
Hight (H)	0,375
Very Hight (VH)	0,425
Very Very Hight (VVH)	0,475

Πίνακας 4.2.: Βάρη κριτηρίων μεθόδου TOPSIS

Το άθροισμα των βαρών πρέπει να ισούται με μονάδα. Για το λόγο αυτό γίνεται πολλές φορές κανονικοποίηση με σκοπό να τηρείται το προηγούμενο σημαντικό κριτήριο.

Εκτελώντας τη μέθοδο TOPSIS και αλλάζοντας τη βαρύτητα ενός κριτηρίου κλιμακωτά κάθε φορά, όπως φαίνεται παρακάτω, w_1 η βαρύτητα του ενός κριτηρίου και w_2 η βαρύτητα των υπολοίπων η οποία ισοκατανέμεται σε αυτά, (Σύμφωνα με τον πίνακα η ελάχιστη βαρύτητα είναι 0,005 και η μέγιστη 0,475. Κάνοντας την κανονικοποίηση που χρειάζεται ώστε το άθροισμα των βαρών να είναι μονάδα προκύπτει ελάχιστη βαρύτητα 0,006 και μέγιστη 0,44.)

$w_1=0.006$ και $w_2=0.142$

$w_1=0.14$ και $w_2=0.12$

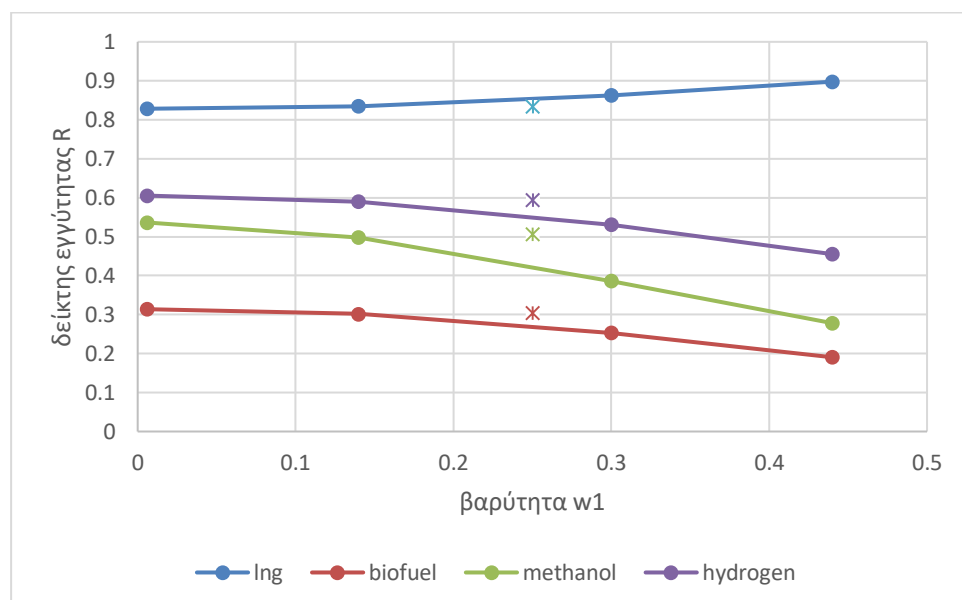
$w_1=0.3$ και $w_2=0.1$

$w_1=0.44$ και $w_2=0.08$

προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:

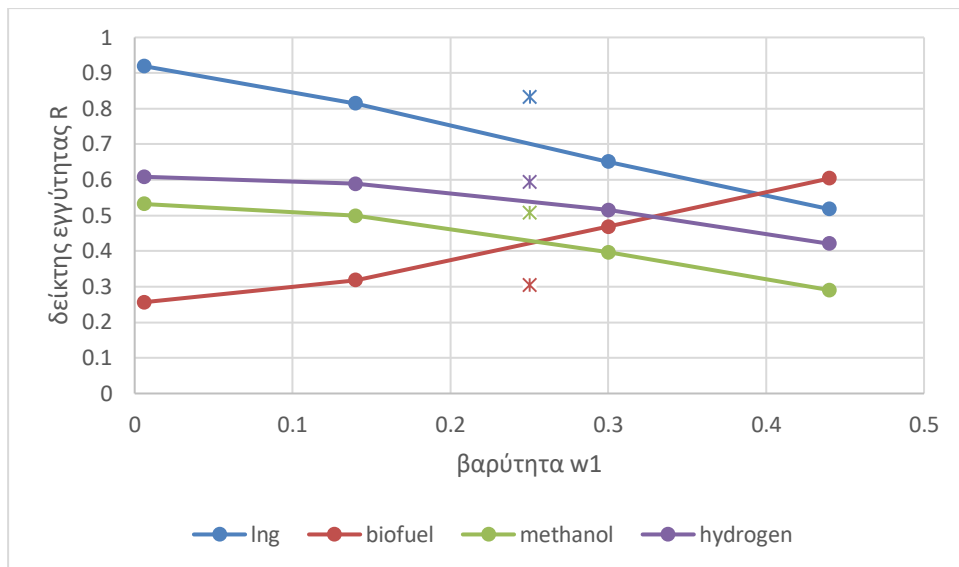
Σε κάθε διάγραμμα φαίνεται με ίδιο χρώμα ο δείκτης εγγύτητας όταν όλα τα σενάρια είναι ισοβαρή.

A) Αλλαγή βαρύτητας κόστους καυσίμου



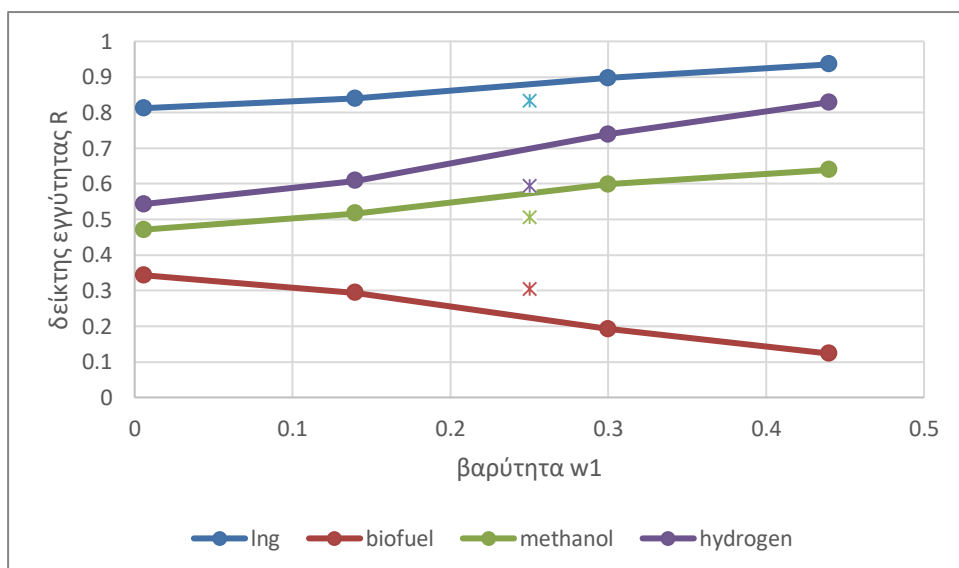
Δεν παρατηρείται αλλαγή στην ιεραρχία των λύσεων. Επειδή το LNG με βάση τα δεδομένα του 2018 έχει τη μικρότερη τιμή όσο αυξάνεται η βαρύτητα τόσο ανεβαίνει η τιμή του δείκτη R. Τα υπόλοιπα καύσιμα έχουν σχετικά μεγαλύτερες τιμές οπότε με την αύξηση της βαρύτητας πέφτει ο δείκτης R.

Β) Εκπομπές CO₂



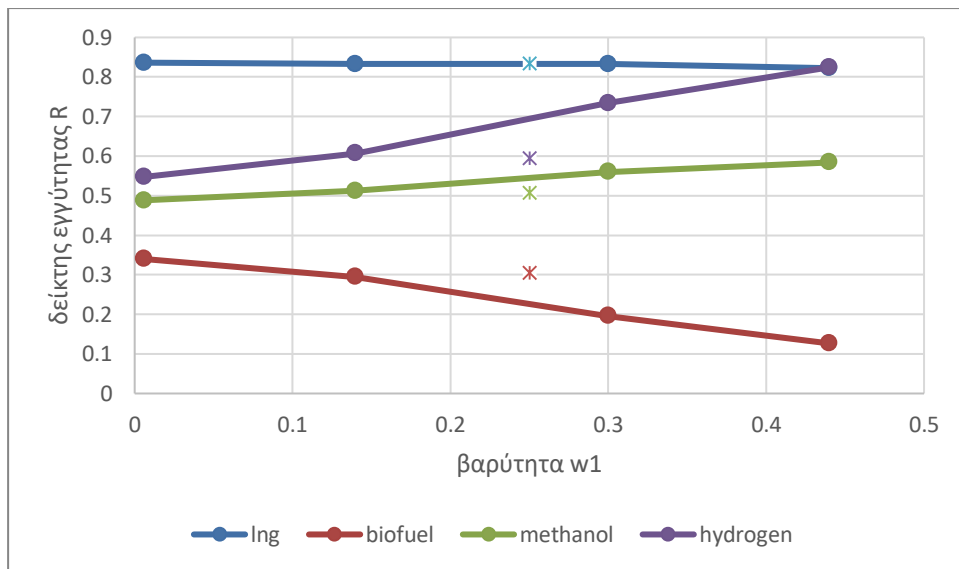
Καθώς αυξάνεται η βαρύτητα παρατηρείται μεταβολή στους δείκτες εγγύτητας με τα βιοκαύσιμα να μετατρέπονται σε καλύτερη λύση. Και αυτό διότι έχουν τις χαμηλότερες εκπομπές με αρκετά μεγάλη απόκλιση από τα υπόλοιπα καύσιμα.

Γ) Ποσοστό εκπομπών SO_x



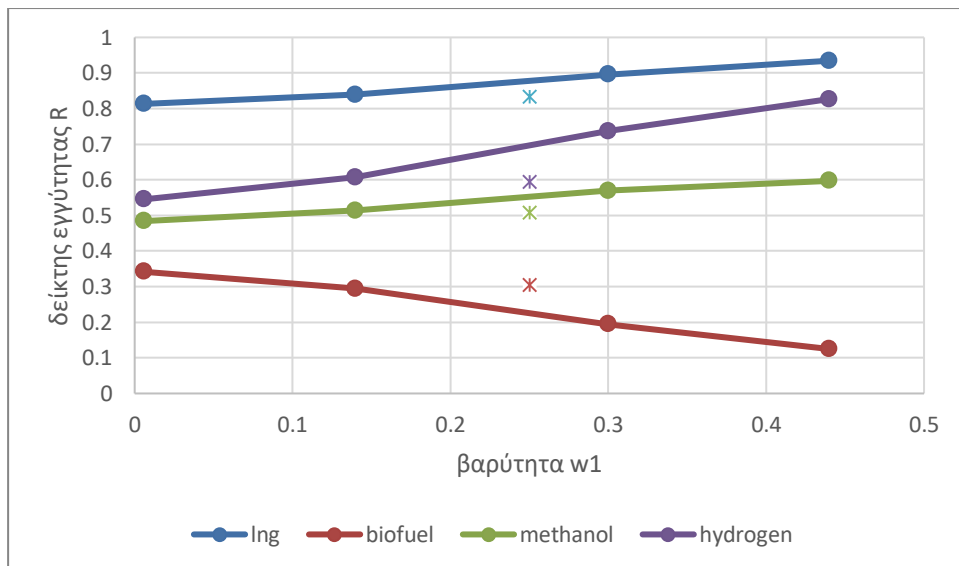
Ανάλογη περίπτωση με το Α).

Δ) Ποσοστό εκπομπών NOx



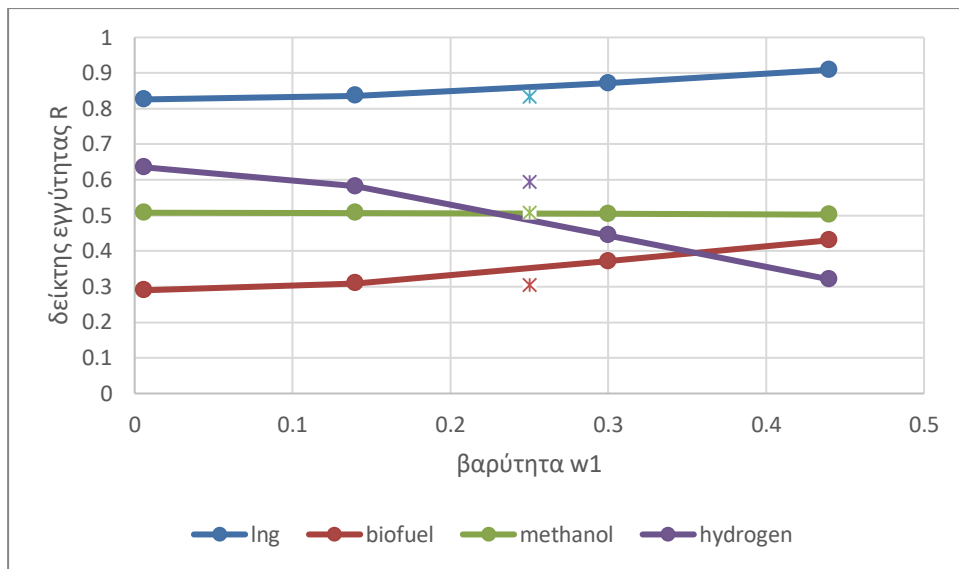
Ανάλογη περίπτωση με το Α). Όμως, παρατηρείται ότι καθώς το κριτήριο παίρνει τη μέγιστη βαρύτητα το υδρογόνο αποτελεί την καλύτερη λύση καθώς έχει τις μικρότερες εκπομπές.

Ε) Ποσοστό εκπομπών PM



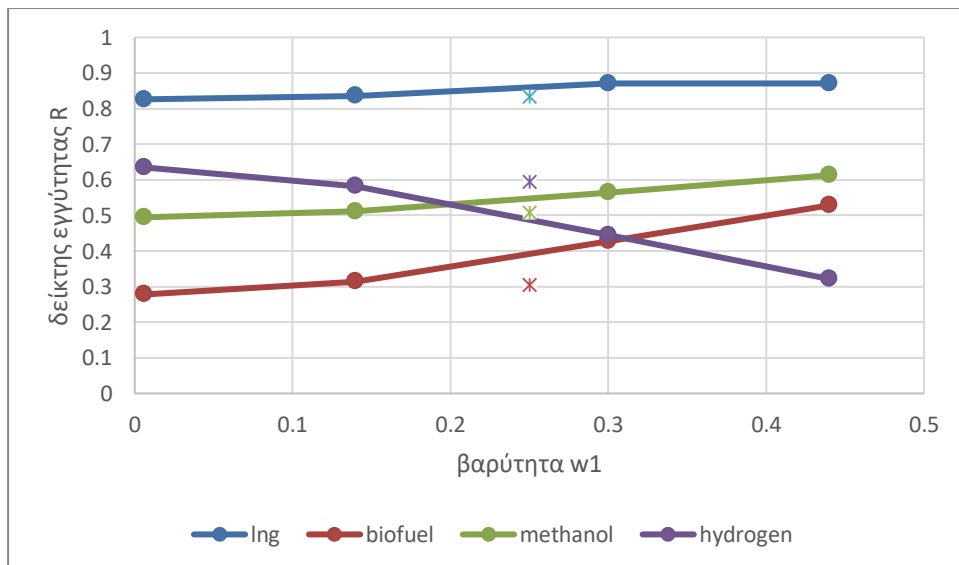
Ανάλογη περίπτωση με το Α).

ΣΤ) Διαθεσιμότητα καυσίμων



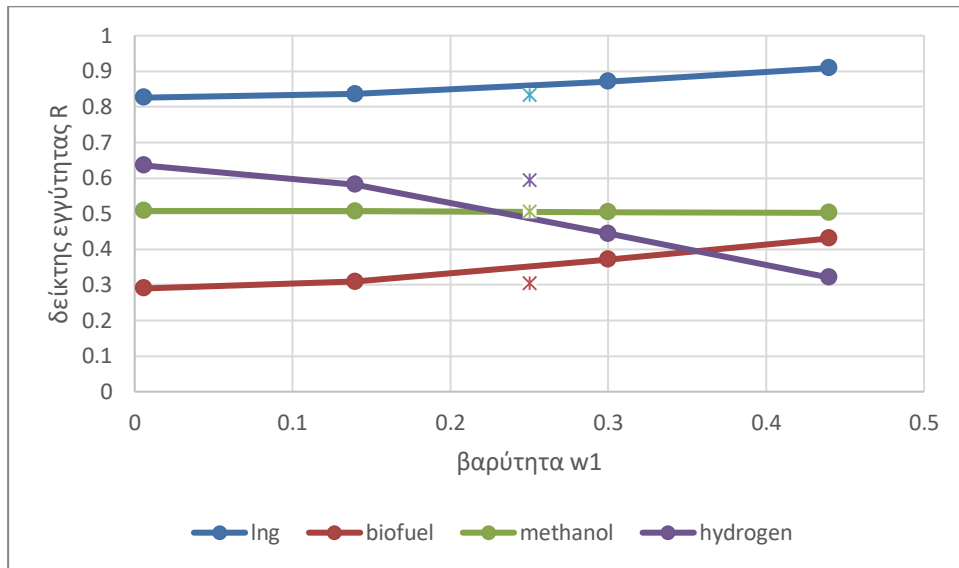
Όταν η βαρύτητα του συγκεκριμένου κριτηρίου είναι αρκετά μικρή η ιεραρχία παραμένει σταθερή. Καθώς όμως αυξάνεται η βαρύτητα η ιεραρχία μεταβάλλεται ανάλογα με τις τιμές των κριτηρίων του εκάστοτε καυσίμου γι' αυτό και το υδρογόνο καταλαμβάνει την τελευταία θέση.

Ζ) Διαθέσιμες εγκαταστάσεις



Ομοίως με το ΣΤ).

Η) Ωριμότητα τεχνολογίας



Παρόμοια περίπτωση με το ΣΤ).

Συμπερασματικά, η ιεραρχία των κριτηρίων εξαρτάται από την ιεραρχία των τιμών των κριτηρίων του εκάστοτε καυσίμου. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν τοποθετείται μέγιστη βαρύτητα, καθώς όταν η βαρύτητα είναι ελάχιστη δεν αλλάζει η ιεραρχία σε σχέση με τα αποτελέσματα της μεθόδου με ισοβαρή κριτήρια.

4.3. Συμπεράσματα

Αυτή η μελέτη επανεξέτασε τη δυνατότητα για μια πληθώρα επιλογών για την απομάκρυνση του άνθρακα από τη διεθνή ναυτιλία, συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων, των τεχνολογιών ενεργειακής απόδοσης, των λειτουργιών και των πολιτικών.

Σύμφωνα με τη μέθοδο TOPSIS το καλύτερο καύσιμο για επίτευξη του στόχου του 2050 αποτελεί το LNG. Αυτό σημαίνει ότι για να επιτευχθεί ο στόχος που έχει τεθεί θα πρέπει άμεσα να γίνει αλλαγή καυσίμων LNG, γεγονός εφικτό αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους ήδη υπάρχοντες κινητήρες. Αποτελεί μια πολύ καλή και αξιόπιστη λύση καθώς εφαρμόζεται ήδη στην πράξη με απτά, θετικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, μεγάλο θέμα αποτελεί το κόστος το οποίο εξαρτάται από το φυσικό αέριο που εμφανίζει αρκετές αυξομειώσεις, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την αύξηση της τιμής του στις αρχές του 2020. Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα τους είναι περιορισμένη καθώς αποτελεί ορυκτό καύσιμο. Γι' αυτό το λόγο θεωρείται ενδιάμεση λύση. Συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι το 2030 και εν συνεχεία με βάση τη μέθοδο TOPSIS το αμέσως πιο κατάλληλο είναι το υδρογόνο. Η μελέτη αυτή, έλαβε χώρα με τη χρήση συγκεκριμένων ποσοτικών (5) και ποιοτικών (3) κριτηρίων. Το γεγονός αυτό δεν καθιστά τη μέθοδο ως τον πιο αποτελεσματικό τρόπο επιλογής αλλά μία αξιόλογη λύση υπό ιδανικές συνθήκες. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλα κριτήρια, αλλά αυτά θεωρήθηκαν ως πιο σημαντικά για τη συγκεκριμένη εργασία μέσω της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.

Ωστόσο δεν υπάρχει ενιαίος δρόμος για την πλήρη απαλλαγή από τη χρήση άνθρακα στη ναυτιλιακή βιομηχανία, επομένως απαιτείται πολύπλευρη απάντηση. Παρόλο που έχει τις ρίζες του σε ένα πολύπλοκο διεθνές κανονιστικό πλαίσιο, η απαλλαγή από άνθρακα θα μπορούσε να υποστηριχθεί από μακροπρόθεσμη, συνεπή και αποτελεσματική πολιτική που θα επιτρέψει στη βιομηχανία να μειώσει αποτελεσματικά τις εκπομπές.

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) είναι η κύρια εναλλακτική λύση στο θαλάσσιο ντίζελ και το μαζούτ (MDO και HFO) και θα μπορούσε να προσφέρει οικονομικά αποδοτική μείωση των εκπομπών CO₂, ενώ θα πληρούσε τους κανονισμούς εκπομπών SO_x και NO_x. Ωστόσο, το όφελος του θερμοκηπίου (GHG) μειώνεται με ολίσθηση μεθανίου, με συνολική μείωση 8-20% σε σύγκριση με το HFO και το MDO. Το LNG είναι προς το παρόν φθηνότερο από τα υπάρχοντα ναυτιλιακά

καύσιμα, αλλά η υποδομή πρέπει να επεκταθεί για να αυξηθεί το μερίδιο αγοράς. Το LNG δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα για να αντιμετωπίσει τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50%, αλλά πρέπει να συνδυαστεί με μέτρα απόδοσης, όπως αργό ατμό, αιολική βοήθεια, ή ακόμη και να αναμειχθεί με βιο-LNG.

Τα βιοκαύσιμα έχουν μεγάλες δυνατότητες ως εναλλακτικά καύσιμα και θα ήταν πιο εμπορικά βιώσιμα όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα καύσιμα με υγρά ή αέρια βάση. Ωστόσο, οι εκπομπές, το κόστος και η εφαρμογή ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό σε διαφορετικά βιοκαύσιμα και οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της εξάρτησης από τα βιοκαύσιμα για τις μεταφορές θα μπορούσαν τελικά να είναι επιζήμιες για την επίτευξη μιας βιώσιμης βιομηχανίας.

Λόγω του προφίλ εκπομπών και της ευελιξίας του υδρογόνου ως καυσίμου, η δυνατότητα μείωσης των εκπομπών στη ναυτιλία και η ενεργοποίηση των ανανεώσιμων βιομηχανιών είναι υψηλή, για παράδειγμα με τη χρήση χερσαίων πυρηνικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου. Οι απαιτήσεις έντασης κεφαλαίου για υποδομές μπορεί να αφήσουν το υδρογόνο ως μια μακροπρόθεσμη λύση, αλλά μπορεί να είναι πιο οικονομικά εφικτό να επιλέξουμε αρχικά συγκεκριμένα μεγάλα σκάφη (π.χ. βυτιοφόρα) και διαδρομές «από σημείο σε σημείο» που θα τροφοδοτούνται με υδρογόνο, ελαχιστοποιώντας τις απαιτήσεις υποδομής. Η πυρηνική πρόωση θα μπορούσε σχεδόν να απαλλαγεί από τη χρήση άνθρακα και είναι κατάλληλη για σκάφη που απαιτούν πηγή ενέργειας υψηλής πυκνότητας με μεγάλα ταξίδια, αλλά τα προβλήματα ασφάλειας είναι πιθανό να παραμείνουν ως το κύριο εμπόδιο για την εμπορική ναυτιλία. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ο ήλιος και ο άνεμος έχουν τη δυνατότητα να αυξήσουν την απόδοση των πλοίων και να βοηθήσουν την πρόωση, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου. Με την ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και βελτιωμένων σχεδίων μικρών πλοίων, ενδέχεται στο μέλλον να υπάρχει στόλος ικανός να λειτουργεί με πολύ λίγα συμβατικά καύσιμα.

Ακόμη και με τα συμβατικά καύσιμα, διάφορα μέτρα απόδοσης μπορούν να προσφέρουν σημαντική δυνατότητα απαλλαγής από τον άνθρακα. Ο αργός ατμός μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO₂ κατά 20-30%, και έως και 60% στα άκρα. Ο μεγαλύτερος χρόνος ταξιδιού μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος αποθέματος και μπορεί να χρειαστεί να χρηματοδοτηθεί και να ασφαλιστεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αλλά μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία του προγραμματισμού. Τα αντιρρυπαντικά χρώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως

εμπόδιο ενάντια στη βιορύπανση και να μειώσουν την αντίσταση, αλλά απαιτείται περαιτέρω εργασία για τον προσδιορισμό του κόστους-οφέλους και της πιθανής συμβολής στη μείωση των εκπομπών από τον στόλο. Η ανάκτηση θερμότητας απορριμμάτων από τους κινητήρες των πλοίων μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση καυσίμου περίπου 4-16%.

Υπάρχει προφανώς μια αντιστάθμιση κόστους-εκπομπών, όπου οι πιο οικονομικά αποδοτικές επιλογές, όπως το LNG, προσφέρουν προς το παρόν μόνο μέτριες βελτιώσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η ισορροπία μεταξύ οικονομικά αποδοτικών καυσίμων και βελτιωμένων μέτρων αποδοτικότητας είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του κόστους. Για να επιτευχθεί η πιθανότητα 50% να επιτευχθεί μείωση 50% των αερίων θερμοκηπίου με πλοία με καύσιμο LNG, πρέπει να εφαρμοστούν και οι πέντε κατηγορίες μέτρων απόδοσης μαζί. Τα βιοκαύσιμα καύσιμα ωστόσο απαιτούν μικρή βελτίωση της απόδοσης για την επίτευξη του στόχου 50%, αν και η περιορισμένη διαθεσιμότητα βιο-πόρων και οι επιπλοκές στη διασφάλιση της βιωσιμότητας καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των καυσίμων μπορεί να ενθαρρύνουν περαιτέρω τη λήψη μέτρων απόδοσης για τη μείωση της κατανάλωσης.

Με έναν αυξανόμενο ναυτιλιακό τομέα, η εφαρμογή ενός ανώτατου ορίου στις παγκόσμιες εκπομπές ναυτιλίας θα διασφαλίσει ότι αυτή η ανάπτυξη θα επαναπροσανατολιστεί προς βιώσιμα μονοπάτια. Ένας μηχανισμός βασισμένος σε πιστωτικές συναλλαγές θα παρέχει ευελιξία (χαλάρωση ναυτιλιακών πρακτόρων) και θα δώσει περιθώριο στη βιομηχανία να αναπτυχθεί και να επιλέξει από διάφορες επιλογές. Τα έσοδα που δημιουργούνται από πιστωτικές προσεγγίσεις μπορούν να συμβάλουν σε επενδύσεις όπως περαιτέρω έρευνα σε έργα για την κλιματική αλλαγή, χρηματοδότηση υποδομών που είναι απαραίτητες για LNG και άλλα εναλλακτικά καύσιμα και αποζημίωση αναπτυσσόμενων χωρών που επιβαρύνονται άδικα από ένα ανώτατο όριο. Ωστόσο, τα πιο σημαντικά για τον ναυτιλιακό τομέα, τα έσοδα αυτά μπορούν να χρηματοδοτήσουν τις επιδοτήσεις και τα κίνητρα που απαιτούνται για τη μείωση των εκπομπών και την αύξηση της αποτελεσματικότητας. Θα απαιτηθούν αυστηρές ρυθμίσεις για τον περιορισμό του κινδύνου διαρροής άνθρακα.

Σε τελική ανάλυση, είναι απαραίτητο η διαδρομή προς την απαλλαγή της ναυτιλίας από τον άνθρακα να περιλαμβάνει έναν συνδυασμό καυσίμων, τεχνολογίας και πολιτικής και ότι οι διάφοροι συνδυασμοί του καθενός εξυπηρετούν βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προσεγγίσεις. Με το LNG να είναι οικονομικά

εφικτό, τεχνολογικά ασφαλές και να εγγυάται περιβαλλοντικά οφέλη βραχυπρόθεσμα, ένας συνδυασμός επιδοτήσεων και λιμενικών τελών μπορεί να επιταχύνει αποτελεσματικά την εφαρμογή του. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω εξέταση για να οδηγήσει τη χρήση πυρηνικών, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και υδρογόνου μακροπρόθεσμα. Και οι δύο προσεγγίσεις μπορούν να επαινούνται από προγράμματα ενεργειακής απόδοσης, τόσο τεχνολογικά όσο και πολιτικά. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να καθιερωθεί βραχυπρόθεσμα μια γενική πολιτική για να προωθηθεί η ταχεία και δίκαιη απαλλαγή από τον άνθρακα που χρειάζεται αυτός ο σημαντικός τομέας.

Παράρτημα

Κώδικας MATLAB που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS.

```
clear all
close all
clc

%quantitative criteria
q1=5;
%qualitative criteria
q2=3;

x=[0.03 7 5 630 0 18 0 9;0.16 5 3 210 3 100 13 7;0.16 ...
   5 1 790 1 40 5 1; 0.12 1 3 680 0 0 0 3];

xol=sqrt(sum(x.^2));

for ii=1:1:size(x,1)
    for jj=1:1:size(x,2)
        a(ii,jj)=x(ii,jj)/xol(jj);
    end
end

n=4;
%the weight of the no n criterion
w1=0.44;
%the weight of the rest of the criteria
w2=0.08;

for ii=1:1:size(x,1)
    a(ii,n)=a(ii,n)*w1;
end

for ii=1:1:size(x,1)
    for jj=1:1:n-1
        a(ii,jj)=a(ii,jj)*w2;
    end
    for jj=n+1:1:size(x,2)
        a(ii,jj)=a(ii,jj)*w2;
    end
end

aplus=max(a);
amin=min(a);
for ii=1:1:q1
    a_fplus(ii)=amin(ii);
    a_fmin(ii)=aplus(ii);
end
for ii=(q1+1):1:(q1+q2)
    a_fplus(ii)=aplus(ii);
    a_fmin(ii)=amin(ii);
end

for ii=1:1:size(x,1)
    dplus(ii)=0;
```



```
    dmin(ii)=0;
end
for jj=1:1:size(x,1)
    for ii=1:1:size(x,2)
        dplus(jj)=dplus(jj)+(a(jj,ii)-a_fplus(ii))^2;
        dmin(jj)=dmin(jj)+(a(jj,ii)-a_fmin(ii))^2;
    end
    dplus(jj)=sqrt(dplus(jj));
    dmin(jj)=sqrt(dmin(jj));
    R(jj)=dmin(jj)/(dmin(jj)+dplus(jj));
end
```

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] A. Miola, B. Ciuffo. Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources. *Atmospheric environment*. 45 (2011) 2242-51.
- [2] Ø. Buhaug, J. Corbett, Ø. Endresen, V. Eyring, J. Faber, S. Hanayama, et al. Second IMO GHG study 2009. International Maritime Organization, London, 2009.
- [3] W. UNCTAD. United Nations conference on trade and development. *Review of Maritime Transport*. (2014).
- [4] J. Hoffmann, S. Kumar. Globalisation—the maritime nexus. in: C.T.H. Grammenos, (Ed.). *The Handbook of Maritime Economics and Business*. Lloyd’s List, London, 2010.
- [5] J. Lister, R.T. Poulsen, S. Ponte. Orchestrating transnational environmental governance in maritime shipping. *Global Environmental Change*. 34 (2015) 185-95.
- [6] IMO. EEDI - rational, safe and effective. International Maritime Organization, London, 2012.
- [7] International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives*. OECD/IEA, Paris, 2017.
- [8] World Resources Institute. *CAIT - Historical Emissions Data*. 2017.
- [9] UNCTAD. *Review of Maritime Transport*. 2017.
- [10] Shell. *Sky Scenario*. 2018.
- [11] Marine Environment Protection Committee. Resolution MEPC.176(58): Amendments to the annex of the Protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto (Revised MARPOL Annex VI) in MEPC 58/23/Add.1 in: International Maritime Organization, (Ed.). 2008.
- [12] IMO. Adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reducing GHG emissions in the shipping sector. Note by the International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue. International Maritime Organization, London, UK, 2018. pp. 1-27.
- [13] IBIA. Test data for 2017 show limited share of low sulphur residual fuels. The International Bunker Industry Association, 2018.
- [14] D. Lowell, H. Wang, N. Lutsey. Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used in international shipping. in: International Council on Clean

Transportation, (Ed.). MJ Bradley and Associates & International Council on Clean Transportation (2013).

[15] M.S. Eide, C. Chryssakis, Ø. Endresen. CO₂ abatement potential towards 2050 for shipping, including alternative fuels. *Carbon Management*. 4 (2013) 275-89.

[16] E.A. Bouman, E. Lindstad, A.I. Riialand, A.H. Strømman. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 52 (2017) 408-21.

[17] J. Faber, H. Wang, D. Nelissen, B. Russell, D.S. Amand. Reduction of GHG emissions from ships: Marginal Abatement Costs and Cost Effectiveness of Energy-Efficiency Measures. in: SNAME, (Ed.). International Maritime Organization (IMO), London, UK, 2011.

[18] P. Gilbert, C. Walsh, M. Traut, U. Kesieme, K. Pazouki, A. Murphy. Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production*. 172 (2018) 855-66.

[19] International Transport Forum. Decarbonising Maritime Transport: Pathways to zero carbon shipping by 2035. Case-specific policy analysis. International Transport Forum2018. pp. 1-86.

[20] J. Yuan, S.H. Ng, W.S. Sou. Uncertainty quantification of CO₂ emission reduction for maritime shipping. *Energy Policy*. 88 (2016) 113-30.

[21] H. Lindstad, R. Verbeek, M. Blok, S.v. Zyl, A. Hübscher, H. Kramer, et al. GHG emission reduction potential of EU-related maritime transport and on its impacts. TNO, Delft, The Netherlands, 2014. pp. 1-130.

[22] T. Smith, C. Raucci, S.H. Hosseinloo, I. Rojon, J. Calleya, S.S.D.L. Fuente, et al. CO₂ Emissions from International Shipping: Possible reduction targets and their associated pathways. UMAS, London, UK, 2016. pp. 1-61.

[23] Y. Shi. Reducing greenhouse gas emissions from international shipping: Is it time to consider market-based measures? *Marine Policy*. 64 (2016) 123-34.

[24] Z. Wan, A. el Makhoulfi, Y. Chen, J. Tang. Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations. *Marine Pollution Bulletin*. 126 (2018) 428-35.

[25] G. Nikolakaki. Economic incentives for maritime shipping relating to climate protection. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 12 (2012) 17-39.

- [26] Marine Flottenkommando. Number of ships in the world merchant fleet between January 1, 2008 and January 1, 2017, by type. Statistica, 2018.
- [27] R. Green, I. Staffell. Electricity in Europe: exiting fossil fuels? *Oxford Review of Economic Policy*. 32 (2016) 282-303.
- [28] US Energy Information Administration. US Natural Gas Imports by Country. 2018.
- [29] T.W.P. Smith, J.P. Jalkanen, B.A. Anderson, J.J. Corbett, J. Faber, S. Hanayama, et al. Third IMO GHG Study. International Maritime Organization, London, 2015. pp. 1-327.
- [30] World Bank. World Development Indicators. 2018.
- [31] US Energy Information Administration. International Energy Outlook 2016. 2016.
- [32] N. Olmer, B. Comer, B. Roy, X. Mao, D. Rutherford. Greenhouse Gas Emissions From Global Shipping, 2013-2015. in: ICCT, (Ed.). *The International Council on Clean Transportation* 2017. pp. 1-38.
- [33] C. Wang, J.J. Corbett. The costs and benefits of reducing SO₂ emissions from ships in the US West Coastal waters. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 12 (2007) 577-88.
- [34] C. Deniz, B. Zincir. Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*. 113 (2016) 438-49.
- [35] L. Jiang, J. Kronbak, L.P. Christensen. The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. *Emission Control Areas and their Impact on Maritime Transport*. 28 (2014) 19-27.
- [36] J. Vidal. Health risks of shipping pollution have been 'underestimated'. *Environment, Pollution*. The Guardian 2009.
- [37] G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. in: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, et al. (eds.), (Ed.). In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.
- [38] IMO. Third IMO GHG Study 2014 - Executive Summary and Final Report. 1 ed. International Maritime Organization, London, UK, 2015. pp. 1-327.
- [39] DNV GL Maritime. Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility. in: I.M. Organization, (Ed.). 2016.

- [40] J.N. Cape, M. Coyle, P. Dumitrescu. The atmospheric lifetime of black carbon. *Atmospheric Environment*. 59 (2012) 256-63.
- [41] B. Comer, N. Olmer, X. Mao, B. Roy, D. Rutherford. Black carbon emissions and fuel use in global shipping, 2015. International Council on Clean Transportation (ICCT), Washington, DC, 2017.
- [42] IMO. Brief History of IMO. International Maritime Organization, London, 2017.
- [43] DNV GL Maritime. Upcoming environmental regulations for emissions to air – IMO NO_x Tier III. 2015.
- [44] M. Doudnikoff, R. Lacoste. Effect of a speed reduction of containerships in response to higher energy costs in Sulphur Emission Control Areas. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 28 (2014) 51-61.
- [45] M. Rozmarynowska, B. Ołdakowski. Implications of new regulation regarding sulphur content in ship's fuel on maritime transport sector within Baltic Sea Region. TransBaltic project ed. Baltic Ports Organization Secretariat, Helsinki, Finland, 2012.
- [46] IMO. Prevention of Air Pollution from Ships. International Maritime Organization, London, 2017.
- [47] W. Todts. Air Pollution from ships. 2017.
- [48] O. Schinas, M. Butler. Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships. *Ocean Engineering*. 122 (2016) 84-96.
- [49] International Council on Clean Transportation. The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships. 2011.
- [50] L. Stevens, C. Sys, T. Vanellander, E. van Hassel. Is new emission legislation stimulating the implementation of sustainable and energy-efficient maritime technologies? *Research in Transportation Business & Management*. 17 (2015) 14-25.
- [51] A. Bernatik, P. Senovsky, M. Pitt. LNG as a potential alternative fuel – Safety and security of storage facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 24 (2011) 19-24.
- [52] D. Stenersen, O. Thonstad. GHG and NO_x emissions from gas fuelled engines. Mapping, verification, reduction technologies. SINTEF Ocean AS, Trondheim, Norway, 2017. pp. 1-52.
- [53] F. Burel, R. Taccani, N. Zuliani. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy*. 57 (2013) 412-20.

- [54] S. Jafarzadeh, N. Paltrinieri, I.B. Utne, H. Ellingsen. LNG-fuelled fishing vessels: A systems engineering approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 50 (2017) 202-22.
- [55] T. Wilson, D. Turaga. Drivers for LNG Fueled Marine Vessels Vary by Region. ADI Analytics 2015.
- [56] A.B. Smith. Gas fuelled ships: fundamentals, benefits classification & operational issues. Proceedings of the first gas fuelled ships conference, Hamburg, Germany 2010.
- [57] S. Wang, T. Notteboom. The adoption of liquefied natural gas as a ship fuel: A systematic review of perspectives and challenges. *Transport Reviews*. 34 (2014) 749-74.
- [58] P. Balcombe, N.P. Brandon, A.D. Hawkes. Characterising the distribution of methane and carbon dioxide emissions from the natural gas supply chain. *Journal of Cleaner Production*. 172 (2018) 2019-32.
- [59] R.A. Alvarez, D. Zavala-Araiza, D.R. Lyon, D.T. Allen, Z.R. Barkley, A.R. Brandt, et al. Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain. *Science*. (2018).
- [60] O. Schuller, B. Reuter, J. Hengstler, S. Whitehouse, L. Zeitzen. Greenhouse Gas Intensity of Natural Gas. Thinkstep AG, Natural & Bio Gas Vehicle Association (NGVA) Europe, 2017. p. 180.
- [61] R. Verbeek, G. Kadijk, P.v. Mensch, C. Wulffers, B.v.d. Beemt, F. Fraga. Environmental and Economic Aspects of Using LNG as a Fuel for Shipping in The Netherlands. TNO, Delft, The Netherlands, 2011. pp. 1-48.
- [62] S. Bengtsson, K. Andersson, E. Fridell. A comparative life cycle assessment of marine fuels liquefied natural gas and three other fossil fuels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 225 (2011) 97-110.
- [63] P. Balcombe, K. Anderson, J. Speirs, N. Brandon, A. Hawkes. The Natural Gas Supply Chain: The Importance of Methane and Carbon Dioxide Emissions. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 5 (2017) 3-20.
- [64] S. Bengtsson, K. Andersson, E. Fridell. A comparative life cycle assessment of marine fuels: liquefied natural gas and three other fossil fuels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M-Journal of Engineering for the Maritime Environment 2011. pp. 97-110.

- [65] J. Cofala, M. Amann, C. Heyes, F. Wagner, Z. Klimont, M. Posch, et al. Analysis of policy measures to reduce ship emissions in the context of the revision of the national emissions ceilings directive. (2007).
- [66] I. Ohashi. Dual-Fuel Marine Engine (Highly Reliable Environmentally Friendly Engine). YANMAR Technical Review. (2015).
- [67] J. Algell, A. Bakosch, B. Forsman. Feasibility Study on LNG Fuelled Short Sea and Coastal Shipping in the Wider Caribbean Region. (2012).
- [68] MAN Diesel & Turbo. Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, Denmark, 2012. pp. 1-18.
- [69] Ship & Bunker. World Bunker Prices. 2018.
- [70] Bunker Index. Bunker Index MDO, BIX MDO. Southport, UK, 2018.
- [71] DNV GL Maritime. Current Price Development of Oil and Gas. Norway, 2018.
- [72] M. Alvorado. Presentation: Methanol. in: IHS, (Ed.). IHS2016. pp. 1-34.
- [73] Intratec. Methanol Price History & Forecast. Historical Prices in USA, Netherlands, China, India & Forecast. Houston, Texas, 2018.
- [74] Methanex. Methanex Monthly Average Regional Posted Contract Price History. Methanex Corporation, Accessed from: www.methanex.com/our-business/pricing, 2018.
- [75] M. Baumgart, J. Olsen. LNG-fuelled Vessels in the Norway Short Sea Market; A CostEffective Response to Environmental Regulation (Published Master Thesis). University of BergenNorway. (2010).
- [76] F. Adamchak. LNG as marine fuel. Gas Technology Institute 17th International conference (2013).
- [77] S. Brynolf, E. Fridell, K. Andersson. Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. Journal of Cleaner Production. 74 (2014) 86-95.
- [78] P. Balcombe, J.F. Speirs, N. Brandon, A. Hawkes. Methane emissions: choosing the right climate metric and time horizon. Environmental Science: Processes & Impacts. (2018).
- [79] A. Florentinus, C. Hamelinck, A. van den Bos, R. Winkel, M. Cuijpers. Potential of Biofuels for Shipping – Final Report. ed. Ecofys, European Maritime Safety Agency (EMSA), Utrecht, Netherlands, 2012.

- [80] L. Wei, R. Cheng, H. Mao, P. Geng, Y. Zhang, K. You. Combustion process and NO_x emissions of a marine auxiliary diesel engine fuelled with waste cooking oil biodiesel blends. *Energy*. 144 (2018) 73-80.
- [81] IEA. Biofuels for the marine shipping sector. An overview and analysis of sector infrastructure, fuel technologies and regulations. IEA Bioenergy (2017).
- [82] European Commission. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council, of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Official Journal of the European Union (2009).
- [83] Maritime Knowledge Center, TNO, TU Delft. Methanol as an alternative fuel for vessels. 2018.
- [84] A. Stephenson, D. MacKay. Life Cycle Impacts of Biomass Electricity in 2020. in: D.o.E.a.C. Change, (Ed.).2014.
- [85] R. Matthews, N. Mortimer, J.P. Lesschen, T.J. Lindroos, L. Sokka, A. Morris, et al. Carbon impacts of biomass consumed in the EU: quantitative assessment. The Research Agency of The Forestry Commission (2015).
- [86] R. Slade, A. Bauen, R. Gross. The Global Bioenergy Resource. *Nature Climate Change*. 4 (2014).
- [87] P. Riddell. Nexus Trade-Offs and Strategies for Addressing the Water, Energy and Food Security Nexus in Africa. 1st ed. IWA/IUCN/ICA, Geneva, 2015.
- [88] J. Andrews, B. Shabani. Where does hydrogen fit in a sustainable energy economy? *Procedia engineering*. 49 (2012) 15-25.
- [89] D. Argyros, C. Raucci, N. Sabio, T. Smith. Global Marine Fuel Trends 2030. Lloyd's Register Group Limited, University College London Energy Institute, London, 2014.
- [90] Methanex. Industry welcomes four new ocean-going vessels capable of running on methanol. 2018.
- [91] ETIP Bioenergy. Biofuels In Shipping - Potential Of Biodiesel, Biomethane, Methanol And SOFC Technology For Ships. (2016).
- [92] I. Staffell, D. Scamman, A.V. Abad, P. Balcombe, P.E. Dodds, P. Ekins, et al. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*. In press (2018).

- [93] J. Speirs, P. Balcombe, E. Johnson, J. Martin, N. Brandon, A. Hawkes. A Greener Gas Grid: What are the Options? in: Sustainable Gas Institute, (Ed.). White Paper Series. Imperial College London, London, 2017. pp. 1-132.
- [94] P. Balcombe, J. Speirs, E. Johnson, J. Martin, N. Brandon, A. Hawkes. The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 91 (2018) 1077-88.
- [95] C. Machens. Emission-Free Hydrogen For Shipping. Ship-technology.com, Marine Hydrogen and Fuel Cell Association (MHFCA) 2017.
- [96] Y.M.A. Welaya, M.M. El Gohary, N.R. Ammar. A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 3 (2011) 141-9.
- [97] T. Tronstad, H.H. Åstrand, G.P. Haugom, L. Langfeldt. Study on the use of fuel cells in shipping. in: D.G. Maritime, (Ed.). EMSA European Maritime Safety Agency, Hamburg, Germany, 2017. pp. 1-108.
- [98] Ship Technology. Viking Lady Offshore Supply Vessel. 2010.
- [99] P. Pospiech. World's first fuel-cell ship FCS Alsterwasser proves its reliability. 2012.
- [100] Y. Bicer, I. Dincer. Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A life cycle approach. *International Journal of Hydrogen Energy*. 43 (2018) 1179-93.
- [101] ITF, OECD. Decarbonising Maritime Transport - Pathways to zero-carbon shipping by 2035. International Transport Forum, 2018.
- [102] E. Sturman. NH3 Engine Overview. NH3 Fuel Conference 2016. Sturman Industries, Los Angeles, US, 2017.
- [103] S. Crolius. Ammonia-Powered Internal Combustion Engines. Ammonia Energy, 2016.
- [104] C. Raucci, J. Calleya, S. Suarez De La Fuente, R. Pawling. Hydrogen on Board Ship: A First Analysis of Key Parameters and Implications. Marine Research Group. Bartlett Energy Institute, University College London, London, 2014.
- [105] I. Staffell. The Energy and Fuel Data Sheet. 2011.
- [106] Australian Maritime Safety Authority. Australia and Japan develop safety standards for shipping liquid hydrogen. 2017.
- [107] D. Sadler, A. Cargill, M. Crowther, A. Rennie, J. Watt, S. Burton, et al. H21 – Leeds City Gate. Leeds City Gate , Northern Gas Networks, Wales and West Utilities, 2016.

- [108] O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson, S. Few. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017) 30470-92.
- [109] J. Speirs, P. Balcombe, E. Johnson, J. Martin, N. Brandon, A. Hawkes. A greener gas grid: What are the options. *Energy Policy*. 118 (2018) 291-7.
- [110] A.E. Farrell, D.W. Keith, J.J. Corbett. A strategy for introducing hydrogen into transportation. *Energy and Resources Group Energy Policy*. 31 (2003) 1357–67.
- [111] F. Vogler, D.G. Würsig. *Fuel Cell Systems in Maritime Applications – Challenges, Chances and Experiences*. ZemShips Final Conference ed. Germanischer Lloyd AG, Hamburg, 2011.
- [112] S. Norwegian Electric. Another Ferry Contract for NES. 2017.
- [113] O. Schmidt, A. Hawkes, A. Gambhir, I. Staffell. The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Nature Energy*. 2 (2017) 17110.
- [114] G.M. Moore, C.A. Banuelos, T.T. Gray. Replacing Highly-Enriched Uranium in Naval Reactors. NTI, March. (2016).
- [115] A. Petrovich. The imperatives of development of the Northern Sea Route in the XXI century. *oko-planet.su*. 2013.
- [116] J. Pike. Project 10081 Sevmorput. *Global Security*2018.
- [117] A. International Atomic Energy. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), Vienna International Centre, Austria, 2014.
- [118] S.E. Hirdaris, Y.F. Cheng, P. Shallcross, J. Bonafoux, D. Carlson, B. Prince, et al. Considerations on the potential use of Nuclear Small Modular Reactor (SMR) technology for merchant marine propulsion. *Ocean Engineering*. 79 (2014) 101-30.
- [119] J. Fingas. Russia debuts largest ever nuclear icebreaker. 2016.
- [120] W.M. Arkin, J. Handler. *Naval Accidents, 1945-1988*. Neptune Papers, Neptune Paper No 3 Washington: Greenpeace, Institute for Policy Studies. (1989).
- [121] Royal Academy of Engineering. *Future Ship Powering Options - Exploring alternative methods of ship propulsion*. 2013.
- [122] I. Staffell, S. Pfenninger. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*. 114 (2016) 1224–39.
- [123] S.E. Hirdaris, C.Y. F. *The Role of Technology in Green Ship Design*. 11th International Marine Design Conference, Glasgow, UK, 2012.

- [124] T. Smith, P. Newton, G. Winn, A.G.L. Rosa. Analysis techniques for evaluating the fuel savings associated with wind assistance. Low Carbon Shipping Conference, London, UK, 2013. pp. 1-13.
- [125] T. Smith, C. Raucci, S.H. Hosseinloo, I. Rojon, J. Calleya, S.S.D.L. Fuente, et al. CO2 emissions from international shipping. Possible reduction targets and their associated pathways. 2016.
- [126] M. Traut, P. Gilbert, C. Walsh, A. Bows, A. Filippone, P. Stansby, et al. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*. 113 (2014) 362-72.
- [127] IWSA. IWSA Member – eConowind BV. The International Windship Association 2018.
- [128] FathomShipping. Could Wind Power Return To Commercial Shipping? gCaptain 2012.
- [129] N. Rehmatulla, S. Parker, T. Smith, V. Stulgis. Wind technologies: Opportunities and barriers to a low carbon shipping industry. *Marine Policy*. 75 (2017) 217-26.
- [130] VPO Global. Eco Marine Power and Teramoto Iron works sign patent license agreement for energy-saving propulsion solutions. 2018.
- [131] S. Pfenninger, I. Staffell. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy*. 114 (2016) 1251–65.
- [132] M. Maloni, J.A. Paul, D.M. Gligor. Slow steaming impacts on ocean carriers and shippers. *Maritime Economics & Logistics*. 15 (2013) 151-71.
- [133] C.-Y. Lee, H.L. Lee, J. Zhang. The impact of slow ocean steaming on delivery reliability and fuel consumption. *Transportation Research Part E: Transport and Environment*. 76 (2015) 176-90.
- [134] S. Mander. Slow steaming and a new dawn for wind propulsion: A multi-level analysis of two low carbon shipping transitions. *Marine Policy*. 75 (2017) 210-6.
- [135] T. Tezdogan, A. Incecik, O. Turan, P. Kellett. Assessing the impact of a slow steaming approach on reducing the fuel consumption of a containership advancing in head seas. *Transportation Research Procedia*. 14 (2016) 1659-16668.
- [136] J. Faber, D. Nelissen, G. Hon, H. Wang, M. Tsimplis. Regulated Slow Steaming in Maritime Transport: An Assessment of Options, Costs and Benefits. CE Delft, Delft, The Netherlands, 2012. pp. 1-117.

- [137] P. Cariou. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 16 (2011) 260-4.
- [138] World Shipping Council. *Carbon Emissions*. 2017.
- [139] C. Ma, F. von Hippel. Ending the Production of Highly Enriched Uranium for Naval Reactors. *The Nonproliferation Review*. 8 (2008) 86-101.
- [140] P. Cariou, A. Cheaitou. The effectiveness of a European speed limit versus an international bunker-levy to reduce CO₂ emissions from container shipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 17 (2012) 116-23.
- [141] N. Rehmatulla, J. Calleya, T. Smith. The implementation of technical energy efficiency and CO₂ emission reduction measures in shipping. *Ocean Engineering*. 139 (2017) 184-97.
- [142] E. Almeida, T.C. Diamantino, O. de Sousa. Marine paints: The particular case of antifouling paints. *Progress in Organic Coatings*. 59 (2007) 2-20.
- [143] D. Carreau, K. Vallée-Réhel, I. Linossier, F. Quiniou, R. Davy, C. Compère, et al. Development of environmentally friendly antifouling paints using biodegradable polymer and lower toxic substances. *Progress in Organic Coatings*. 77 (2014) 485-93.
- [144] M.S. Selim, M.A. Shenashen, S.A. El-Safty, S.A. Higazy, M.M. Selim, H. Isago, et al. Recent progress in marine foul-release polymeric nanocomposite coatings. *Progress in Materials Science*. 87 (2017) 1-32.
- [145] T. Smith, E. O’Keeffe, L. Aldous, P. Agnolucci. *Assessment of Shipping's Efficiency Using Satellite AIS data*. (2013).
- [146] J. Willsher. *The Effect of Biocide Free Foul Release Systems on Vessel Performance* International Paint Ltd, London, 2008.
- [147] J.A. Fernandes, L. Santos, T. Vance, T. Fileman, D. Smith, J.D.D. Bishop, et al. Costs and benefits to European shipping of ballast water and hull-fouling treatment: Impacts of native and non-indigenous species. *Marine Policy*. 64 (2016) 148-55.
- [148] IMO. *Anti-fouling systems*. 2003.
- [149] B.-G. Paik, K.-Y. Kim, S.-R. Cho, J.-W. Ahn, S.-R. Cho. Investigation on drag performance of anti-fouling painted flat plates in a cavitation tunnel. *Ocean Engineering*. 101 (2015) 264-74.
- [150] G. Swain. The importance of ship hull coatings and maintenance as drivers for environmental sustainability. *Quarterly Journal of Ship Hull Performance*. 1 (2011) 50-8.

- [151] E. Harrould-Kolieb, J. Savitz. Shipping Solutions: Technological and Operational Methods Available to Reduce CO₂. 2010.
- [152] K. Senary, A. Tawfik, E. Hegazy, A. Ali. Development of a waste heat recovery system onboard LNG carrier to meet IMO regulations. Alexandria Engineering Journal. 55 (2016) 1951-60.
- [153] D.V. Singh, E. Pedersen. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. Energy Conversion and Management. 111 (2016) 315-28.
- [154] M.-H. Yang, R.-H. Yeh. Thermodynamic and economic performances optimization of an organic Rankine cycle system utilizing exhaust gas of a large marine diesel engine. Applied Energy. 149 (2015) 1-12.
- [155] F. Baldi, C. Gabrieli. A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications. Energy. 80 (2015) 654-65.
- [156] C. Sprouse, C. Depcik. Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. Applied Thermal Engineering. 51 (2013) 711-22.
- [157] G. Theotokatos, G. Livanos. Techno-economical analysis of single pressure exhaust gas waste heat recovery systems in marine propulsion plants. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 227 (2013) 83-97.
- [158] G.A. Livanos, G. Theotokatos, D.-N. Pagonis. Techno-economic investigation of alternative propulsion plants for Ferries and RoRo ships. Energy Conversion and Management. 79 (2014) 640-51.
- [159] Z. Ma, D. Yang, Q. Guo. Conceptual design and performance analysis of an exhaust gas waste heat recovery system for a 10000TEU container ship. Polish Maritime Research. 19 (2012) 31-8.
- [160] R. Hutter, L. De Libero, P. Elbert, C.H. Onder. Catalytic methane oxidation in the exhaust gas aftertreatment of a lean-burn natural gas engine. Chemical Engineering Journal. 349 (2018) 156-67.
- [161] J. Kamieniak, P.J. Kelly, C.E. Banks, A.M. Doyle. Methane emission management in a dual-fuel engine exhaust using Pd and Ni hydroxyapatite catalysts. Fuel. 208 (2017) 314-20.
- [162] D.J. Worth, M.E.J. Stettler, P. Dickinson, K. Hegarty, A.M. Boies. Characterization and Evaluation of Methane Oxidation Catalysts for Dual-Fuel Diesel and Natural Gas Engines. Emission Control Science and Technology. 2 (2016) 204-14.

- [163] B. Sweeney. Shipping CO₂ emissions can be eliminated by Calix RECAST system. Energy Systems Conference London, UK, 2018.
- [164] G.H. Rau, K. Caldeira. Enhanced carbonate dissolution:: a means of sequestering waste CO₂ as ocean bicarbonate. *Energy Conversion and Management*. 40 (1999) 1803-13.
- [165] G.H. Rau. CO₂ Mitigation via Capture and Chemical Conversion in Seawater. *Environmental Science & Technology*. 45 (2011) 1088-92.
- [166] R.M. Cuéllar-Franca, A. Azapagic. Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization*. 9 (2015) 82-102.
- [167] Project LEILAC. Low Emission Intensity Lime and Cement project: FEED summary report. 2017.
- [168] RAEng. Greenhouse gas removal. Royal Academy of Engineering, London, UK, 2018. pp. 1-136.
- [169] DNV GL. Low carbon shipping towards 2050. 2017.
- [170] Wisdom Events. Bio-LNG to Overtake Traditional LNG? 2017.
- [171] I.A.G. Wilson, I. Staffell. Rapid fuel switching from coal to natural gas through effective carbon pricing. *Nature Energy*. 3 (2018) 365-72.
- [172] W.S. Council. World Port Rankings. 2015.
- [173] C. Walsh, S. Mander, A. Larkin. Charting a low carbon future for shipping: A UK perspective. *Marine Policy*. 82 (2017) 32-40.
- [174] IEA. Energy Technology Perspectives 2017. in: I.E. Agency, (Ed.). OECD/IEA, Paris, 2017. pp. 1-443.
- [175] Z. Wan, A. el Makhoulfi, Y. Chen, J.Y. Tang. Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations. *Marine Pollution Bulletin*. 126 (2018) 428-35.
- [176] R. Halim, L. Kirstein, O. Merk, L. Martinez. Decarbonization Pathways for International Maritime Transport: A Model-Based Policy Impact Assessment. *Sustainability*. 10 (2018) 2243.
- [177] D. Harrison, D. Radov, J. Patchett. Evaluation of the feasibility of alternative marketbased mechanisms to promote low-emission shipping in European Union sea areas NERA Economic Consulting, London, 2004.
- [178] R. McIlveen, D. Helm, S. Less. Greener, Cheaper. Policy Exchange, London, 2010.

- [179] J. Reinaud. Issues behind competitiveness and carbon leakage. Focus on Heavy Industry Paris: IEA IEA Information Paper. 2 (2008).
- [180] S. Ribeiro-Kahn, S. Kobayashi, M. Beuthe, J. Gasca, D. Greene, D. Lee, et al. Transport and its infrastructure. IPCC Fourth Assessment Report: Working Group III Report "Mitigation of Climate Change". Intergovernmental Panel on Climate Change 2007.
- [181] M. Despines, S. Bullock, M. Childs, T. Picken. A dangerous distraction: why offsets are a mistake the U.S. cannot afford to make. Friends of the Earth, Washington, 2009.
- [182] J. David Harrison, PhD, D. Radov, J. Patchett, P. Klevnas, A. Lenkoski, P. Reschke, et al. Economic Instruments for Reducing Ship Emissions in the European Union NERA Consulting, European Commission DG Environment, London, 2005.
- [183] H.N. Psaraftis, C.A. Kontovas. Balancing the economic and environmental performance of maritime transportation. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 15 (2010) 458-62.
- [184] IMO. Reduction of GHG Emissions from Ships. International Maritime Organization, 2011.
- [185] H.N. Psaraftis. Market-based measures for greenhouse gas emissions from ships: a review. WMU Journal of Maritime Affairs. 11 (2012) 211-32.
- [186] M.-L. Song, Y. Guan, F. Song. Environmental efficiency, advances in environmental technology and total factor of environmental productivity of China. Kybernetes. 42 (2013) 943-54.
- [187] M.M. Rahim, M.T. Islam, S. Kuruppu. Regulating global shipping corporations' accountability for reducing greenhouse gas emissions in the seas. Marine Policy. 69 (2016) 159-70.
- [188] J. Moffat. Arranging deckchairs on the titanic: climate change, greenhouse gas emissions and international shipping. Australian and New Zealand Maritime Law Journal. 24 (2010) 104-25.
- [189] A. Miola, M. Marra, B. Ciuffo. Designing a climate change policy for the international maritime transport sector: Market-based measures and technological options for global and regional policy actions. Energy Policy. 39 (2011) 5490-8.
- [190] S. Brunner, C. Flachsland, G. Luderer, O. Edenhofer. Emissions Trading Systems: an overview. (2009).

- [191] M. Nicolini, M. Tavoni. Are renewable energy subsidies effective? Evidence from Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 74 (2017) 412-23.
- [192] Asian Development Bank (1985). In: Proceedings of regional conference on sail-motor propulsion. Manila, Philippines: Asian Development Bank: 18-21 November.
- [193] Biert, L. *et al.* (2016). 'A review of fuel cell systems for maritime applications', *Journal of Power Sources* 327 (2016) 345e364. Available: www.sciencedirect.com.
- [194] Buhaug Ø, Corbett J, Endresen Ø, Eyring V, Faber J, Hanayama S, et al. (2009). *Second IMO GHG study 2009*. London: International Maritime Organisation.
- [195] DNV GL (2019). 'Comparison of alternative marine fuels', for SEALNG, DNV GL rep. no. 2019-0567.
- [196] Gilpin, D. (2012). *Flagships of the future. Presentation to the Sustainable Sea Transport Talanoa 2012*. Suva: University of the South Pacific.
- [197] International Council on Clean Transportation (2011). *Reducing greenhouse gas emissions from ships: cost effectiveness of available options*. Washington: ICCT.
- [198] Nuttall, P. (2013). *Sailing for sustainability: the potential of sail technology as an adaptation tool for Oceania*. PhD thesis. Victoria University, Wellington.
- [199] Palmer, C. and Corten, E.M.J. (1985). Preliminary design study of inrailand transport vessels for the Ha'apai Group of islands in the Kingdom of Tonga. In: Proceedings of regional conference on sail-motor propulsion. Manila: Asian Development Bank: 133-170.
- [200] Rojon, I. (2013). Blowin' in the wind? Possibilities of the International Maritime Organization to promote the uptake of wind propulsion in international shipping, Masters thesis, Utrecht University; 2013.
- [201] Satchwell C.J. (1985). Windship technology: in: Proceedings of the international symposium on windship technology (Windtech '85). Southampton, U.K.: April 24–25.
- [202] United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (1984). Wind-powered vessels for coastal and inter-island use in the Asian and Pacific Region. Technical papers submitted to the meeting of experts on the application of windpower in shipping. Tokyo/Niigata; 1984: 14-16 April.
- [203] Veldhuizen V., N., Hekkenberg, R. G., & Codiglia, L. (2020). 'Fuel cell systems applied in expedition cruise ships: A comparative impact analysis'. In V. Bertram (Ed.), Proceedings of the 12th Symposium on High-Performance Marine Vehicles, HIPER '20 (pp. 170-188). Technische Universität Hamburg-Harburg. Available:

<https://research.tudelft.nl/en/publications/fuelcell-systems-applied-in-expedition-cruise-ships-a-comparativ>

- [204] Xing, H., et al. (2021). 'Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives'. *Sustainability* 2021, 13, 1213. <https://doi.org/10.3390/su13031213>
- [205] Aczel, J. and Saaty, T. L. (1983). Procedures for synthesizing ratio judgments. *J. math. Psychol.* **27** (1), 93-102.
- [206] Chen, C.T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets Syst.*, **114**: 1-9.
- [207] Dawes, Robyn M. (1988). *Rational Choice in an Uncertain World*. Hartcourt Brace Jovanovich, Publishers.
- [208] Jahanshahloo, G.R.; Lotfi, F.H. and Izadikhah, M. (2006). Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. *Appl. Math. Comput.*, **181**: 1544-1551.
- [209] Kahneman, Daniel; Slovic, Paul and Tversky, Amos (1982). *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [300] Keen, P. G. W. (1980). Adaptive Design for Decision Support Systems. *SIGMIS Database*, **12** (1-2): 15-25.
- [301] Keen, Peter G. W. and Morton, Michael S. Scott (1978). *Decision Support Systems: An Organizational Perspective*. Addison-Wesley.
- [302] Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- [303] Saaty, T. L. (1982). *Decision Making for Leaders*. Wadsworth, Belmont, Calif.
- [304] Saaty, T. L. (1986a). Absolute and relative measurement with the AHP. The most livable cities in the United States. *Socio-econ. Plum Sci.*, **20** (6), 327-331.
- [305] Saaty, T. L. (1986b). Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Mgmt Sci.* **32** (7): 841-855.
- [306] Saaty, Thomas L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, **48**: 9-26.
- [307] Saaty, T. L. and Kearns, K. P. (1985). *Analytical Planning*. Pergamon Press, Oxford.
- [308] Saaty, T. L. and Vargas, L. G. (1981). *The Logic of Priorities, Applications in Bussiness, Energy, Health, Transportation*. Kluwer-Nijhoff. The Hague.
- [309] Saaty, T. L. and Vargas, L. (1987). Stimulussresponse with reciprocal kernels: the rise and fall of sensation. *J. math. Sci.*

- [310] Simon, H. (1960). *The New Science of Management Decision*. New York: Harper & Row.
- [311] Yoon, K. (1980). *System Selection by Multiple Attribute Decision Making*. Ph.D. Dissertation, Kansas State University, Manhattan, KS, USA.
- [312] Yoon, K. and Hwang, C.L. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- [313] Ναθαναήλ, Ευτυχία Γ. (2017). *Διαδικασία πολυκριτήριας ανάλυσης, Αναλυτική ιεραρχική μέθοδος*. Διδακτικές σημειώσεις. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. shorturl.at/dxRT9 (ημερομηνία ανάκτησης: 21 Σεπτεμβρίου 2021).
- [314] Shell International B.V. (2020). *Decarbonising Shipping: All Hands On Deck*
- [315] Christina Nunez (2021) *Biofuels Offer a Cost-Effective Way to Lower Shipping Emissions*. Argonne National Laboratory
- [316] Uchenna Kasieme, Kavyan Pazouki, Alan Murphy and Andreas Chrysanthou (2019). *Biofuel as an Alternative Shipping Fuel: Technological, Environmental and Economic Assessment*. Royal Society of Chemistry: Sustainable Energy & Fuels
- [317] Lloyd's Register, UMAS (2019) Zero – Emission Vessels: Transition Pathways
- [318] DNV GL, Energy Transition Outlook 2021: A Global and Regional Forecast to 2050
- [319] Ewa Roszkowska (2011). *Multi – Criteria Decision Making Models by Applying the Topsis Method to Crisp and Interval Data*.
- [320] SEA LNG Ltd (2020). *Global Fleet: The number of vessels using LNG as a marine fuel is growing rapidly*.
- [321] Balcombe P., Brierley J., Lewis C., Skatvedt L. (2019). *How to Decarbonise International Shipping: Options for Fuels, Technologies and Policies*. Energy Conversion and Management
- [322] Hansson J., Brynolf S., Fridell E., Lehtveer M. (2020) *The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel – Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis*. Sustainability 2020