



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΝΘΡΩΠΙΣΤΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ο ρόλος των εναλλακτικών καυσίμων για την μείωση του
ανθρακικού αποτυπώματος στον τομέα της ναυτιλίας»**

ΣΟΥΖΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

A.M. 153210

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΑΡΝΕΛΛΟΣ

Αθήνα, 2023

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («Σούζα Κωνσταντίνου») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζουν οι θαλάσσιες μεταφορές στο παγκόσμιο εμπόριο και την οικονομία, επισημαίνοντας το υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα της ναυτιλίας λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Η εργασία εξετάζει πιθανές λύσεις μέσω εναλλακτικών καυσίμων και συστημάτων μετατροπής ενέργειας, με έμφαση στην ενεργειακή μετάβαση και την ανθρακική ουδετερότητα.

Παράλληλα, αναδεικνύονται οι προκλήσεις που αντιμετωπίζονται για την εφαρμογή των εναλλακτικών καυσίμων στη ναυτιλία, όπως η έλλειψη κατάλληλου ρυθμιστικού πλαισίου και οι ανεπάρκειες σε περιβαλλοντικά πρότυπα. Επίσης, αναφέρονται τα δύσκολα προβλήματα που προκύπτουν κατά την μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα, όπως οι απαιτούμενες επενδύσεις, η μετασκευή πλοίων και εγκαταστάσεων, καθώς και η ανάγκη επανεκπαίδευσης του πληρώματος.

Τέλος, επισημαίνεται η έλλειψη διεθνών προτύπων για την ασφάλεια των εναλλακτικών καυσίμων και τα περιβαλλοντικά τους αποτελέσματα, καθώς και η δυσκολία αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους.

Λέξεις κλειδιά: Εναλλακτικά καύσιμα, Ανθρακικό αποτύπωμα, ναυτιλία, Παγκόσμιο εμπόριο, οικονομία, ενεργειακή μετάβαση, ρυθμιστικό πλαίσιο, περιβαλλοντικά πρότυπα, μετασκευή πλοίων, περιβαλλοντικές επιπτώσεις

The Role of Alternative Fuels in Reducing Carbon Footprint in the Shipping Industry

KONSTANTINOS SOUZAS

Abstract

The current paper examines the significant role played by maritime transportation in global trade and the economy. It highlights the high carbon footprint of the shipping industry due to the use of fossil fuels. The thesis explores potential solutions through alternative fuels and energy conversion systems, with a focus on energy transition and carbon neutrality.

Furthermore, it identifies the challenges faced in implementing alternative fuels in the shipping sector, such as the lack of suitable regulatory frameworks and deficiencies in environmental standards. The thesis also addresses the complex issues that arise during the transition to alternative fuels, including the required investments, retrofitting of vessels and infrastructure, crew retraining, and the need for equipment and process recertification.

Lastly, it emphasizes the absence of international standards for the safety of alternative fuels and their environmental impact assessment, highlighting the difficulty in evaluating their environmental consequences.

Keywords: Alternative fuels, carbon footprint, shipping, global trade, economy, energy transition, regulatory framework, environmental standards, vessel retrofitting, environmental impacts

Περιεχόμενα	
Περιεχόμενα	4
Εισαγωγή	5
Κεφάλαιο 1: Η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία στην εξερεύνηση νέων τεχνολογιών για πιο πράσινη ναυτιλία.....	8
1.1. Η πρόκληση που αντιμετωπίζει η ναυτιλιακή βιομηχανία στην αναζήτηση εναλλακτικών καυσίμων	8
1.2. Ανεπάρκειες του υφιστάμενου διεθνούς νομικού πλαισίου.....	11
1.3. Ελλείψεις σε κανονισμούς που βασίζονται σε λόγους πρόληψης της ρύπανσης και ασφάλειας	13
1.4. Έλλειψη περιβαλλοντικών διεθνών προτύπων	15
1.5. Ανεπάρκειες στο σύστημα ευθύνης και αποζημίωσης	17
1.6. Ανεπαρκής διεθνής συνεργασία για την πρόληψη και αντιμετώπιση της ρύπανσης	18
Κεφάλαιο 2: Περιγραφή των συμβατικών καυσίμων και μηχανών μετατροπής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ναυτιλίας	21
2.1. Χρήση βαρέως μαζούτ (HFO)	24
2.2. Χρήση αργού πετρελαίου	26
Κεφάλαιο 3: Εναλλακτικά καύσιμα και τεχνολογίες για πράσινη ναυτιλία.....	31
3.1. Μεθάνιο	33
3.2. Βιοντιζελ.....	34
3.3. Μεθανόλη	35
3.4. Αμμωνία	36
3.5. Το Υδρογόνο ως ναυτιλιακό καύσιμο	39
3.6. Βιοκαύσιμα, φυσικό αέριο και υδρογόνο στην πρόωση πλοίων.....	43
3.7. Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε μπαταρίες.....	44
Κεφάλαιο 4: Βιωσιμότητα και οικονομικές προοπτικές της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στον τομέα της ναυτιλίας	46
4.1. Κυβερνητικές πολιτικές στον τομέα της ναυτιλίας	46
4.2. Περιβαλλοντική Απόδοση Εναλλακτικών Καυσίμων Ναυτιλίας.....	47
4.2.1. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου	48
4.3. Οικονομική Αξιολόγηση των Εναλλακτικών Καυσίμων	49
4.3.1. Κόστος καυσίμου	50
4.3.2. Αποθήκευση εναλλακτικών καυσίμων.....	52
Συμπεράσματα	54
Βιβλιογραφία.....	60

Εισαγωγή

Οι θαλάσσιες μεταφορές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για το παγκόσμιο εμπόριο. Η συμβολή των θαλάσσιων μεταφορών στην ατμοσφαιρική ρύπανση και την κλιματική αλλαγή δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ο σημερινός πληθυσμός του παγκόσμιου εμπορικού στόλου ολικής χωρητικότητας 100 τόνων και άνω είναι περίπου 117.000 πλοία και η συνολική ολική χωρητικότητα είναι 1,36 δισεκατομμύρια τόννοι. Η μέση ετήσια αύξηση ήταν 4,6% κατά αριθμό σκαφών και 5,0% κατά ολική χωρητικότητα από το 2008 έως το 2018 (EMSA, 2019). Κατά την περίοδο από το 2007 έως το 2012, η μέση ετήσια κατανάλωση καυσίμου στη θάλασσα κυμάνθηκε μεταξύ 250 και 325 εκατομμυρίων τόνων και η μέση τιμή εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ήταν 11,3, 20,9 και 1016 εκατομμύρια τόνοι αντίστοιχα. Με βάση διαφορετικά σενάρια, οι εκπομπές CO₂ από τις θαλάσσιες μεταφορές το 2050 προβλέπεται να αυξηθούν κατά 50–250% σε σύγκριση με το 2012 (IMO, 2015). Συνεπώς, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO) έχει υιοθετήσει διάφορους κανονισμούς μέσω προοδευτικών τροποποιήσεων της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL) για τον έλεγχο των εκπομπών SO_x και NO_x και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Ειδικότερα, για τον μετριασμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG), ο IMO υιοθέτησε την αρχική στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τα πλοία (εφεξής καλούμενη ως αρχική στρατηγική του IMO) στις 13 Απριλίου 2018. Οι φιλοδοξίες της αρχικής στρατηγικής του IMO ήταν να μειωθεί η ένταση άνθρακα της διεθνούς ναυτιλίας κατά 70% και οι συνολικές ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050, σε σύγκριση με το 2008, ενώ παράλληλα να συνεχιστούν οι προσπάθειες για τη σταδιακή κατάργησή τους το συντομότερο δυνατό (IMO, 2018). Κατά συνέπεια, το βαρύ μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (LSHFO), το πετρέλαιο ντίζελ πλοίων (MDO), το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης (MGO) ή ισοδύναμα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (EGCS) χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο των εκπομπών SO_x. Επιπλέον, το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG, κυρίως μεθάνιο), το υγραέριο (LPG, κυρίως προπάνιο και βουτάνιο) και η μεθανόλη έχουν καταστεί οι κύριες επιλογές για την τήρηση των προτύπων εκπομπών NO_x του IMO λόγω των περιορισμών των περαιτέρω

βελτιώσεων στην τεχνολογία του κινητήρα και της χαμηλής τεχνολογική στάθμης του EGCS για τις εκπομπές NOx σε πλοία. Επιπλέον, δύο υποχρεωτικοί μηχανισμοί βάσει του παραρτήματος VI της MARPOL, ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης για νέα πλοία και το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου για όλα τα πλοία, έχουν εισαχθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων και τον μετριασμό των εκπομπών CO₂ (Hui Xing, et al., 2021). Ωστόσο, τα υπάρχοντα τεχνολογικά και επιχειρησιακά μέτρα δεν επαρκούν για την επίτευξη των επιπέδων φιλοδοξίας που ορίζονται στην αρχική στρατηγική του IMO (CE Delft και UMAS, 2019). Ως εκ τούτου, εξετάζοντας συστηματικά τη μείωση των εκπομπών SOx, NOx και CO₂, τα εναλλακτικά καύσιμα πλοίων έχουν αναγνωριστεί ως μια πολλά υποσχόμενη λύση.

Αρκετές μελέτες έχουν αξιολογήσει πιθανές εναλλακτικές επιλογές καυσίμων πλοίων με βάση ορισμένες προσεγγίσεις λήψης αποφάσεων. Η ποιοτική αξιολόγηση με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα και τη βιομηχανική εμπειρία ήταν η συνήθως χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής των HFO, MGO, υγρών βιοκαυσίμων (Biomass to Liquids, BtL), μεθυλεστέρα από ελαιοκράμβη, LNG και LBG (υγροποιημένο βιοαέριο) για τις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων συγκρίθηκαν με βάση τέσσερα κριτήρια, δηλαδή τοπικές και περιφερειακές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, υποδομή και κόστος καυσίμων (Selma K Bengtsson, et al., 2013). Το LNG βρέθηκε να έχει τις χαμηλότερες τοπικές και περιφερειακές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά το LBG είχε τη χαμηλότερη συνολική επίδραση. Παρουσιάστηκε μια αξιολόγηση κύκλου ζωής για το LNG, τη μεθανόλη, το υγροποιημένο υδρογόνο (LH₂), το βιοντίζελ και τα φυτικά έλαια (SVO), ενώ εξετάστηκαν πιθανές πηγές βιομάζας ορισμένων καυσίμων και τεχνολογίας CCS. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει άμεσα διαθέσιμη επιλογή καυσίμου για τον μετριασμό των εκπομπών των πλοίων προς το παρόν και ότι οι βιώσιμες εναλλακτικές επιλογές καυσίμων περιορίζονται από διακριτά εμπόδια, όπως η προμήθεια πρώτης ύλης και η παραγωγή καυσίμων. Σε σχετική μελέτη πραγματοποιήθηκε η σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων πλοίων, συμπεριλαμβανομένου του υδρογόνου, της αμμωνίας, της μεθανόλης, του υγραερίου, των φυτικών ελαίων που έχουν υποστεί επεξεργασία με υδρογόνο (HVO) και της ηλεκτρικής ενέργειας από μπαταρίες (DNV, 2019).. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι ποσοτικής αξιολόγησης, συμπεριλαμβανομένης της προσέγγισης ανάλυσης

απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (MCDA) και της αναλυτικής ιεραρχικής μεθόδου (AHP). Η βιωσιμότητα τριών εναλλακτικών καυσίμων πλοίων, συμπεριλαμβανομένου του LNG, της μεθανόλης και του υδρογόνου, αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας την προσέγγιση MCDA, με έντεκα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη (Ren, et al., 2017). Με κριτήριο την βιωσιμότητα προτάθηκε αρχικά το υδρογόνο, το LNG και μετά η μεθανόλη. Με στόχο την τεχνολογική σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων πλοίων, η μεθανόλη, η αιθανόλη, το LNG και το υδρογόνο αξιολογήθηκαν με βάση τη μέθοδο AHP και έντεκα κριτήρια σύγκρισης (Cengiz Deniz & Zincir, 2016). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το LNG ήταν το καταλληλότερο εναλλακτικό καύσιμο πλοίων και η μεθανόλη και η αιθανόλη είχαν τη χαμηλότερη κατάταξη λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας, ενώ τονίστηκε η μελλοντική δυνατότητα του υδρογόνου. Επτά εναλλακτικά θαλάσσια καύσιμα, δηλαδή LNG, LBG, μεθανόλη, βιομεθανόλη, γκρι H₂, πράσινο H₂ (από την ηλεκτρόλυση του νερού μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας) και HVO, διερευνήθηκαν και οι προοπτικές τους αξιολογήθηκαν και ταξινομήθηκαν με βάση δέκα κριτήρια (Hui Xing, et al., 2021). Επιπλέον, λήφθηκαν υπόψη διαφορετικές σταθμίσεις όταν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος AHP. Εξήχθησαν διαφορετικά συμπεράσματα σχετικά με εναλλακτικές επιλογές καυσίμων πλοίων ανάλογα με τις προτιμήσεις των τελικών χρηστών.

Ο τομέας της ναυτιλίας κρίνεται λοιπόν ως απόλυτη προτεραιότητα για τον τομέα των μεταφορών και την παγκόσμια οικονομία. Εντούτοις, η αύξηση των εκπομπών CO₂ στον τομέα της ναυτιλίας τα τελευταία χρόνια από την χρήση ορυκτών καυσίμων συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στην επιβάρυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (International Maritime Organization) έχει θέσει ως στόχο τη μείωση των εκπομπών από τα πλοία κατά 40% ως το 2030, ως μέρος του ενεργειακού πλάνου για το 2050. Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι μία ενδελεχής έρευνα και ανάλυση του τομέα της ναυτιλίας και της συμβολής του στην επιβάρυνση του ανθρακικού αποτυπώματος στο περιβάλλον, το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί αντικαθιστώντας τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα με εναλλακτικά καύσιμα όπως το υδρογόνο, η μεθανόλη, η αμμωνία και τα υγρά βιοκαύσιμα.

Κεφάλαιο 1: Η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία στην εξερεύνηση νέων τεχνολογιών για πιο πράσινη ναυτιλία

Καθώς η ναυτιλία στρέφεται προς πιο πράσινες λειτουργίες και οι ευκαιρίες για αύξηση της απόδοσης του πλοίου μειώνονται (όπως αναπόφευκτα πρέπει), ένα σημαντικό ζήτημα το οποίο πρέπει να αντιμετωπίσει ο κλάδος είναι η μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα. Η ναυτιλία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα και η τεράστια πλειονότητα των πλοίων παγκοσμίως τροφοδοτείται σήμερα από μαζούτ με βάση τους υδρογονάνθρακες, αν και με κάποια διαφοροποίηση στην ποιότητα και τις προδιαγραφές. Η καύση του μαζούτ απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, το οποίο συμβάλλει σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην κλιματική αλλαγή. Το μαζούτ είχε την πρώτη προτίμηση ως καύσιμο στην ναυτιλία, λόγω της υψηλής ενεργειακής του πυκνότητας, της ευρείας διαθεσιμότητας του και της σχετικής ευκολίας με την οποία αποθηκεύεται και μεταφέρεται. Η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα αποτελεί μία σημαντική πρόκληση για όλους τους τομείς της βιομηχανίας. Ωστόσο, οι προκλήσεις ειδικότερα για τη ναυτιλία περιλαμβάνουν την περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης στα πλοία σε συνδυασμό με τις μεγάλες αποστάσεις μεταξύ χερσαίων στάσεων ανεφοδιασμού, την απαραίτητη εγγύτητα αποθήκευσης καυσίμου και χώρους διαβίωσης ανθρώπων στα πλοία, την αβεβαιότητα (σε ορισμένες περιπτώσεις) ως προς το χρονοδιάγραμμα και τους μελλοντικούς λιμένες κλήσης και την προτίμηση να διατηρηθεί η ευελιξία ως προς τις κλήσεις λιμένων (δηλαδή να είναι δυνατή η τροφοδοσία καυσίμων οπουδήποτε παγκοσμίως) και περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης στην ξηρά σε λιμάνια και σε τερματικούς σταθμούς (Pribyl, 2022).

1.1. Η πρόκληση που αντιμετωπίζει η ναυτιλιακή βιομηχανία στην αναζήτηση εναλλακτικών καυσίμων

Όπως μαρτυρούν οι συνεχιζόμενες διασκέψεις του IMO, η επίτευξη μιας ενιαίας λύσης για τη ναυτιλία παγκοσμίως αποτελεί μία σημαντική πρόκληση, και ακόμη κι αν ο κλάδος συμφωνούσε να στραφεί σε ένα μόνο εναλλακτικό καύσιμο, δεν είναι πρακτικά δυνατό να αλλάξει η κατάσταση μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Η αλλαγή καυσίμου

σημαίνει τεράστιες επενδύσεις στην παραγωγή καυσίμων, υποδομές και αλυσίδες εφοδιασμού, μετασκευή κινητήρων πλοίων και εγκαταστάσεων αποθήκευσης και ανεφοδιασμού καυσίμων, τροποποίηση δεξαμενών καυσίμων και συστημάτων παράδοσης καυσίμων, επανεκπαίδευση του πληρώματος και του προσωπικού τερματικού σταθμού, προσαρμογές στις συμβάσεις και επαναξιολόγηση και επαναπιστοποίηση του εξοπλισμού και διαδικασίες. Απαιτεί προνοητικότητα, σχεδιασμό και συνεργασία που εκτείνεται πέρα από τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Απαιτεί επίσης διαθεσιμότητα καυσίμων, σε κλίμακα και σε βιώσιμη τιμή. Κατά συνέπεια, η ναυτιλία βρίσκεται σε μια κλασική κατάσταση όπου κανείς δεν αναλαμβάνει απόλυτα την ευθύνη. Οι ιδιοκτήτες είναι ευνόητα απρόθυμοι να ξεκινήσουν την ανακατασκευή των σκαφών τους (ή να παραγγείλουν νέα πλοία που κατασκευάζονται για να καίνε διαφορετικά καύσιμα), ενώ ποτέ ένα εναλλακτικό καύσιμο δεν έχει αποδειχθεί η βιωσιμότητα του σε πραγματική κλίμακα, δεν είναι παγκοσμίως διαθέσιμο και συνοδεύεται από την υψηλή τιμή που τείνουν τα τεράστια έργα υποδομής να δημιουργήσουν. Εν τω μεταξύ, εάν δεν υπάρχει σήμα ζήτησης από τη ναυτιλία, οι παραγωγοί ενέργειας θα αργήσουν να προσανατολίσουν τις προσπάθειές τους προς τη δημιουργία διαθεσιμότητας εναλλακτικών καυσίμων από την ξηρά και να αρχίσουν να παράγουν σε επαρκή κλίμακα για να προμηθεύουν τις απαραίτητες ποσότητες. Η λύση για να προχωρήσει η κατάσταση πέρα από αυτό το αδιέξοδο φαίνεται να αναδύεται, όπως ισχύει και σε σχέση με άλλες πτυχές της ενεργειακής μετάβασης, σε πιο τοπικό επίπεδο (IMO, 2021).

Δεν είναι όλες οι ναυτιλιακές εργασίες ίδιες, ούτε και όλα τα πλοία. Ως εκ τούτου, οι ανάγκες και η ικανότητα συμβιβασμού ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ του κλάδου. Ένα πλοίο που εκτελεί δρομολόγια μεταξύ των ίδιων λιμένων με τακτικό δρομολόγιο, και ποτέ στη θάλασσα για περισσότερες από μερικές ώρες, μπορεί να χρησιμοποιήσει μια εναλλακτική επιλογή καυσίμου που θα ήταν απλώς ανέφικτο για ένα σκάφος που κατακλύζει τις βαθιές θάλασσες, μακριά από το λιμάνι για εβδομάδες και όχι πάντα γνωρίζοντας σε ποιο λιμάνι θα φτάσει την επόμενη μέρα. Καθώς η αναγνώριση αυτής της πραγματικότητας εξαπλώνεται, οι ιδιοκτήτες και οι χειριστές αναζητούν ολοένα και περισσότερο να βρουν μια λύση που είναι κατάλληλη για το στόλο και τη δραστηριότητά του, αντί να περιμένουν μια ενιαία λύση, και για αυτό τώρα αναδύονται νέες πρακτικές με τη μορφή δοκιμών και πειραμάτων από ένα έως πολλά πλοία (Hoyland & McDonell, 2021).

Δύο σημαντικές σκέψεις που πρέπει να έχει υπόψη της η βιομηχανία κατά τη μετάβασή της σε εναλλακτικά καύσιμα, είναι αφενός ότι ο στόχος της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία υπάρχει στο πλαίσιο της επείγουσας ανάγκης μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από όλες τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες και αφετέρου ο στόχος της μετάβασης σε εναλλακτικά καύσιμα και σε άλλες βιομηχανίες εκτός από τη ναυτιλία καθώς είναι μια ευκαιρία για τη ναυτιλία να συρρικνωθεί, δεδομένου ότι ένα μεγάλο ποσοστό του φορτίου που μεταφέρει (ορισμένοι το βάζουν έως και 40%) είναι ορυκτά καύσιμα. Σε σχέση και με τις δύο αυτές σκέψεις, ένα κρίσιμο ερώτημα για κάθε νέο καύσιμο για τη ναυτιλία είναι κατά πόσο είναι πράσινα τα διαπιστευτήριά του. Η μετατόπιση των εκπομπών στην αλυσίδα παραγωγής, έτσι ώστε να καεί ένα καθαρό καύσιμο στο πλοίο, το οποίο ωστόσο έχει προκύψει από μια ρυπογόνο διαδικασία παραγωγής, δεν θα συμβάλει ικανοποιητικά στην επίλυση της κλιματικής κρίσης. Ομοίως, όπου υπάρχει η ευκαιρία να αναδιαταχθεί η αλυσίδα παραγωγής και εφοδιασμού καυσίμων, η χρήση καυσίμων που έχουν μεταφερθεί άσκοπα σε όλο τον κόσμο, αντί να παράγονται σε εγκαταστάσεις κοντά στην πηγή της ζήτησης, θα αποτελεί μία ελλιπή λύση προς την κατεύθυνση της απανθρακοποίησης. Ακριβώς όπως η ανάμειξη των καυσίμων για την επίτευξη μειωμένης περιεκτικότητας σε θείο οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής σωματιδίων αιθάλης, πυροδοτώντας μια συζήτηση σχετικά με το εάν υπήρχε στην πραγματικότητα καθαρό όφελος από τη μείωση των επιπέδων θείου στα καύσιμα πλοίων, η ευρεία χρήση εναλλακτικών καυσίμων στη ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να προκαλέσει απρόβλεπτες δυσμενείς συνέπειες (Pribyl, 2022). Η επίγνωση αυτής της πιθανότητας και η προσέγγιση του θέματος με όσο το δυνατόν ευρύτερη οπτική γωνία, θα συμβάλει στη μείωση του κινδύνου. Όπως έχουν τα πράγματα επί του παρόντος, φαίνεται ότι η μετάβαση στα εναλλακτικά καύσιμα για τη ναυτιλία είναι πιθανό να καθοδηγηθεί από συμμετέχοντες στον κλάδο και όχι από ρυθμιστικές αρχές, και ότι το μέλλον είναι πιθανό να είναι διαφορετικό. Μια ποικιλία καυσίμων μπορεί να αναπτυχθεί σε ολόκληρο τον κλάδο χωρίς όλους τους τομείς, ή ακόμη και πλοία εντός τομέων, που χρησιμοποιούν το ίδιο καύσιμο και πιθανώς ακόμη και με ορισμένα πλοία που χρησιμοποιούν πολλαπλά καύσιμα και συμπληρώνουν τις επιπλέον ενεργειακές απαιτήσεις με την αιολική ή/και την ηλιακή ενέργεια. Η παραγωγή, η ρύπανση και οι εκπομπές καυσαερίων εκτός του CO₂, θα αποτελέσουν παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή εναλλακτικών καυσίμων και κάποια στιγμή η βιομηχανία μπορεί να αρχίσει να συρρικνώνεται, ως αποτέλεσμα της παγκόσμιας

πτώσης της ζήτησης για ορυκτά καύσιμα. Αυτό μπορεί να συμβαδίσει με τα παλαιότερα πλοία που καίνε (και μεταφέρουν) ορυκτά καύσιμα να φτάνουν φυσικά στο τέλος της ζωής τους και θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση της διάθεσης των πλοίων, καθώς τα πλοία γίνονται οικονομικά και περιβαλλοντικά απαρχαιωμένα (Hoyland & McDonell, 2021).

1.2 Ανεπάρκειες του υφιστάμενου διεθνούς νομικού πλαισίου

Στο πλαίσιο της μετάβασης προς την ανθρακική ουδετερότητα, στην πράξη έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα εναλλακτικά καύσιμα και πηγές ενέργειας για την πρόωση πλοίων. Ωστόσο, το σχετικό διεθνές νομικό πλαίσιο φαίνεται να αποτυγχάνει στην πράξη να ανταποκριθεί στον ρυθμό εφαρμογής εναλλακτικών καυσίμων και έχει αρκετές αδυναμίες και ανεπάρκειες στην αντιμετώπιση της πιθανής ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος που προκαλείται από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα. Όπως προαναφέρθηκε, η ρύπανση από πλοία που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα και ενέργεια για πρόωση υπόκειται σε μια σειρά θαλάσσιων συμβάσεων, συμβάσεων για τα καύσιμα και σε αρχές και κανόνες του εθνικού διεθνούς δικαίου. Αυτές οι συμβάσεις αποτελούν ένα δομικά πολύπλοκο θεσμικό πλαίσιο. Πολλά ενδιαφερόμενα μέρη, συμπεριλαμβανομένων των ρυθμιστικών αρχών των κρατών σημαίας, των παράκτιων κρατών και κρατών λιμένων, των ιδιοκτητών και των χειριστών πλοίων και των θυμάτων που υποφέρουν ως αποτέλεσμα της θαλάσσιας ρύπανσης, πρέπει να αντιμετωπίσουν το ζήτημα της θεσμικής πολυπλοκότητας και της σχετικής σύγχυσης σχετικά με την εφαρμογή της σύμβασης (Tanaka, 2019).

Από την άποψη του θεσμικού πλαισίου που ρυθμίζει τη θαλάσσια ρύπανση, η παραδοσιακή προσέγγιση που βασίζεται στην πηγή ρύπανσης θα μπορούσε να προκαλέσει σύγχυση. Σύμφωνα με το υπάρχον πλαίσιο, η θαλάσσια ρύπανση χωρίζεται σε διάφορες ειδικές κατηγορίες με βάση διαφορετικές πηγές ρύπανσης: ρύπανση από πλοία, ρύπανση από χερσαίες πηγές, ρύπανση από δραστηριότητες βυθού, ρύπανση από χωματερές και ατμοσφαιρική ρύπανση. Με βάση αυτές τις διαφορετικές πηγές, έχουν θεσπιστεί διαφορετικοί νομικοί κανόνες για τη ρύθμιση της θαλάσσιας ρύπανσης. Ωστόσο, στην πράξη, η προσέγγιση που βασίζεται στην πηγή ρύπανσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε αβεβαιότητες όσον αφορά τη ρύθμιση των πλοίων που κινούνται με εναλλακτικά καύσιμα και ενέργεια. Για παράδειγμα, ορισμένα πλοία με φυσικό αέριο εκπέμπουν μεθάνιο στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της ναυσιπλοΐας,

προκαλώντας ατμοσφαιρική ρύπανση και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το εάν η ρύπανση θα πρέπει να ρυθμίζεται με βάση τη ρύπανση από την πηγή των πλοίων ή την ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να δημιουργήσει αβεβαιότητα (Churchill R., et al., 2022). Ένα άλλο παράδειγμα που δείχνει τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η προσέγγιση που βασίζεται στην πηγή ρύπανσης περιλαμβάνει υποδομές ανεφοδιασμού καυσίμων και πλωτές πλατφόρμες ανεφοδιασμού. Στο διεθνές δίκαιο, υπάρχουν διαφωνίες σχετικά με τη θέση των πλωτών πλατφορμών ανεφοδιασμού όσον αφορά το αν πρέπει να οριστούν ως πλοία, τεχνητά νησιά, εγκαταστάσεις ή κατασκευές (Song, 2021). Στην υπόθεση που αφορά το πέρασμα μέσω της Μεγάλης Ζώνης (1991), τα ζητήματα σχετικά με το εάν οι «πλωτές εξέδρες άντλησης πετρελαίου» πρέπει να προσδιορίζονται ως πλοία και να απολαμβάνουν το ίδιο δικαίωμα ελεύθερης διέλευσης με τα πλοία τέθηκαν ενώπιον του ICJ. Ωστόσο, επειδή η υπόθεση διευθετήθηκε εξωδικαστικά, το ICJ δεν έκρινε την ουσία της υπόθεσης. Οι διαφορετικές τοποθετήσεις των πλωτών πλατφορμών ανεφοδιασμού και οι σχετικές διαφωνίες θα εγείρουν ζητήματα για τη ρύθμιση της ρύπανσης σύμφωνα με την παραδοσιακή προσέγγιση που βασίζεται στην πηγή ρύπανσης. Πρέπει αυτές οι πλατφόρμες να ρυθμίζονται με βάση τη ρύπανση από πλοία ή τη ρύπανση από ξηρά; Εάν θεωρηθεί ως ρύπανση από σκάφη, μπορούν οι πλωτές πυρηνικές πλατφόρμες να καλύπτονται από τις υπάρχουσες συμβάσεις πυρηνικής ευθύνης, καθώς ορισμένοι μελετητές διαφωνούν με την ευρύτερη ερμηνεία των συμβάσεων πυρηνικής ευθύνης και υποστηρίζουν ότι αυτές οι συμβάσεις ισχύουν μόνο για τις επίγειες πυρηνικές εγκαταστάσεις; (Handrlica, 2019) Υπό αυτή την έννοια, η παραδοσιακή προσέγγιση που βασίζεται στην πηγή ρύπανσης φαινομενικά δεν είναι καλά εξοπλισμένη για να αντιμετωπίσει σαφώς και αποτελεσματικά τους θαλάσσιους περιβαλλοντικούς κινδύνους και τα προβλήματα ρύπανσης που μπορεί να προκύψουν από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα.

Από τη σκοπιά του θεσμικού πλαισίου που ρυθμίζει τα πλοία και τον έλεγχο της ρύπανσης τους, ασυνεπείς προσεγγίσεις και ζητήματα κατακερματισμού ενδέχεται επίσης να δημιουργήσουν σύγχυση. Για παράδειγμα, τα πυρηνικά πλοία και οι υπεράκτιες πλατφόρμες πυρηνικής ενέργειας υπόκεινται τόσο σε συμβάσεις για την πυρηνική ασφάλεια και την πυρηνική ευθύνη που έχουν διατυπωθεί υπό την αιγίδα του ΔΟΑΕ όσο και σε συμβάσεις σχετικά με την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, τη μεταφορά ραδιενεργών υλικών και τα πυρηνικά πλοία που έχουν διατυπωθεί στο πλαίσιο της υποστήριξης του IMO. Οι πρώτες συχνά επιβάλλουν υποχρεώσεις στον φορέα

εκμετάλλευσης πυρηνικών εγκαταστάσεων, ενώ οι δεύτεροι τείνουν να επιβάλλουν υποχρεώσεις στους πλοιοκτήτες. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις για την υπόθεση της υποχρέωσης μπορεί να οδηγήσουν σε σύγχυση. Ένα άλλο παράδειγμα τέτοιας σύγχυσης αφορά τα πλοία πολλαπλών καυσίμων και υβριδικής ισχύος. Με την ανάπτυξη πλοίων πολλαπλών καυσίμων και υβριδικής ισχύος, οι πηγές ισχύος πρόωσης των πλοίων μπορεί να μην περιορίζονται σε έναν τύπο. Ο πιο πρόσφατος τετράχρονος κινητήρας 49/60 DF που αναπτύχθηκε από τον γερμανικό κατασκευαστή κινητήρων MAN Energy Solutions μπορεί να λειτουργεί με LNG, ντίζελ, μείγματα βιοκαυσίμων και συνθετικό φυσικό αέριο, προσφέροντας ευέλικτες επιλογές καυσίμου προς την απανθρακοποίηση των θαλάσσιων μεταφορών (MAN, 2022). Ωστόσο, η χρήση πολλαπλών καυσίμων στο ίδιο πλοίο υποδηλώνει ότι το πλοίο μπορεί να δεσμεύεται από διαφορετικές διεθνείς συμβάσεις που ρυθμίζουν τη χρήση συγκεκριμένων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των παραδοσιακών συμβάσεων για τη ρύπανση από πετρέλαιο, των συμβάσεων για τα αέρια καύσιμα και των συμβάσεων για τη μεταφορά HNS. Τα πλοία πολλαπλών καυσίμων και υβριδικής ενέργειας είναι πιο πιθανό να αντιμετωπίσουν προβλήματα στον κανονισμό ελέγχου της ρύπανσης. Επιπλέον, το διεθνές ρυθμιστικό πλαίσιο που ρυθμίζει τα πλοία με εναλλακτικά καύσιμα και τον έλεγχο της ρύπανσης τους έχει το πρόβλημα της μη ισορροπημένης ανάπτυξης. Τα εναλλακτικά καύσιμα και η ενέργεια που τέθηκαν σε εφαρμογή πριν από δεκαετίες, όπως η πυρηνική ενέργεια και το LNG, υπόκεινται σε άφθονους διεθνείς κανόνες, ενώ τα αναδυόμενα καύσιμα και ενέργεια, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια και τα βιοκαύσιμα, στερούνται επαρκών ρυθμιστικών κανόνων.

1.3 Ελλείψεις σε κανονισμούς που βασίζονται σε λόγους πρόληψης της ρύπανσης και ασφάλειας

Εκτός από την ναυσιπλοΐα ορισμένων πλοίων με εναλλακτικά καύσιμα, ιδίως πλοίων που χρησιμοποιούν αέρια καύσιμα, όπως LNG, υδρογόνο ή αμμωνία, ενέχει κινδύνους ασφάλειας και θαλάσσιας ρύπανσης, και η διαδικασία ανεφοδιασμού τους σε παράκτιες και λιμενικές υποδομές ανεφοδιασμού είναι επίσης επικίνδυνη. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ρύπανση από πλοία μπορεί μερικές φορές να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια των παράκτιων κρατών και των λιμένων κρατών, αυτά τα κράτη έχουν την εξουσία να ρυθμίζουν τα ξένα πλοία με βάση τους παράγοντες ασφάλειας

σύμφωνα με το UNCLOS (Becker, 2005). Ο κώδικας IGF θεσπίζει επίσης ορισμένους κανόνες για τη διασφάλιση της ασφάλειας των πλοίων που χρησιμοποιούν αέρια και άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης κατά τη διαδικασία ναυσιπλοΐας και ανεφοδιασμού καυσίμων.

Ωστόσο, σύμφωνα με το υφιστάμενο διεθνές νομικό πλαίσιο, οι κανονισμοί ασφάλειας και πρόληψης της ρύπανσης σε πλοία που κινούνται με εναλλακτικά καύσιμα και ενέργεια είναι σε μεγάλο βαθμό ανεπαρκείς. Αν και ορισμένοι σχετικοί κανόνες μπορούν να βρεθούν διάσπαρτοι σε ορισμένες συμβάσεις, πολλά προβλήματα, όπως διαφωνίες σχετικά με την εφαρμογή των κανόνων, το αδιέξοδο επικύρωσης των συμβάσεων και ο περιορισμένος αριθμός συμβαλλόμενων μερών που υπόκεινται σε υποχρεωτικούς περιορισμούς, έχουν δυσκολέψει αρκετά την αποτελεσματική ρύθμιση των εναλλακτικών καυσίμων σε μηχανοκίνητα πλοία. Επιπλέον, το υφιστάμενο νομικό πλαίσιο αναθέτει την εποπτεία στην ανοιχτή θάλασσα στα χέρια του κράτους σημαίας. Ωστόσο, «η εμπειρία δείχνει ότι τα κράτη σημαίας συχνά αποτυγχάνουν να παρέχουν επαρκή εποπτεία με τις λεγόμενες «σημαίες ευκαιρίας» που προσφέρουν χαμηλού κόστους εγγραφή, χαλαρές περιβαλλοντικές και λειτουργικές απαιτήσεις». Ως εκ τούτου, η ρύθμιση και η εποπτεία για τα πλοία με εναλλακτικά καύσιμα σε περιοχές πέρα από τις εθνικές δικαιοδοσίες μπορεί να ενέχει σοβαρές ελλείψεις (Hutchins, 2021).

Επιπλέον, η ρύθμιση των πλοίων που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα με βάση λόγους ελέγχου της ρύπανσης και ανεφοδιασμού καυσίμων μπορεί επίσης να δημιουργήσει εντάσεις με την ελευθερία της ναυσιπλοΐας, αντανakλώντας τη συνεχιζόμενη διαμάχη μεταξύ της «ελευθερίας ναυσιπλοΐας των θαλάσσιων κρατών» και της «ρύθμισης των παράκτιων κρατών». Ωστόσο, το υπάρχον διεθνές νομικό πλαίσιο δεν είναι αποτελεσματικά εξοπλισμένο για να αντιμετωπίσει τις σχετικές αναδυόμενες προκλήσεις. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχουν κίνδυνοι για την ασφάλεια και το περιβάλλον που συνδέονται με τη διαδικασία ανεφοδιασμού καυσίμων για ορισμένα πλοία με εναλλακτικά καύσιμα, ειδικά πλοία με αέριο καύσιμο, ένα ερώτημα στο διεθνές δίκαιο που μπορεί να προκύψει είναι εάν επιτρέπεται στα παράκτια κράτη να υιοθετήσουν ρυθμιστικά μέτρα όπως συστήματα διαχωρισμού της κυκλοφορίας ή δημιουργία ζωνών ασφαλείας γύρω από υποδομές ανεφοδιασμού καυσίμων με βάση την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και περιβαλλοντικούς λόγους. Η UNCLOS (άρθρα 60 – 80) επιτρέπει στα παράκτια κράτη να δημιουργήσουν μια «ζώνη

ασφαλείας 500 μέτρων το πολύ γύρω από τεχνητές εγκαταστάσεις ή κατασκευές» στην αποκλειστική οικονομική ζώνη τους ή στην υφαλοκρηπίδα. Εάν επιτρέπεται από τα «γενικά αποδεκτά διεθνή πρότυπα ή όπως συνιστάται από τον αρμόδιο διεθνή οργανισμό», το πλάτος των ζωνών ασφαλείας μπορεί να υπερβαίνει τα 500 μέτρα (UNCLOS, 1982). Ωστόσο, όσον αφορά το ζήτημα της ζώνης ασφαλείας για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων και υποδομών ανεφοδιασμού καυσίμων στον ωκεανό, υπάρχει έλλειψη σχετικών «ισχυόντων διεθνών προτύπων», «γενικά αποδεκτών διεθνών προτύπων» ή συστάσεων από τον IMO. Ελλείπει σχετικών διεθνών προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών, εάν επιτραπεί στα παράκτια κράτη να έχουν διακριτική ευχέρεια στην ανάπτυξη εγκαταστάσεων και υποδομών ανεφοδιασμού καυσίμων, είναι πιθανό να οδηγήσει σε ζώνες ασφαλείας με μεγάλη ποικιλία εύρους, που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη ναυσιπλοΐα, την αλιεία και την θαλάσσια επιστημονική και ερευνητική δραστηριότητα στα γύρω ύδατα. Εάν τα παράκτια κράτη προωθήσουν σθεναρά την ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων και ενέργειας και κατασκευάσουν πολλές εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού καυσίμων και φόρτισης στον ωκεανό, θα μπορούσε ακόμη και να οδηγήσει σε ένα πιθανό αποτέλεσμα «κλείσιμο μεγάλων περιοχών της θάλασσας στη ναυσιπλοΐα» (Hutchins, 2021). Ως εκ τούτου, για να εξασφαλιστεί η ασφαλής χρήση εναλλακτικών καυσίμων πλοίων και να μετριαστούν οι πιθανές εντάσεις μεταξύ των κανονισμών για τη ρύπανση των παράκτιων κρατών και της ελευθερίας ναυσιπλοΐας των θαλάσσιων κρατών, απαιτείται η διαμόρφωση σχετικών κανόνων για τον ακριβέστερο καθορισμό των ρυθμιστικών αρχών των παράκτιων και λιμενικών κρατών. πάνω από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα και τη διαδικασία ανεφοδιασμού τους.

1.4. Έλλειψη περιβαλλοντικών διεθνών προτύπων

Σε σύγκριση με το παραδοσιακό αργό πετρέλαιο και το ντίζελ, τα εναλλακτικά καύσιμα πλοίων είναι αρκετά νέα και η εκτίμηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων περιλαμβάνει πολλά θέματα αιχμής, ακόμη και ζητήματα που είναι επί του παρόντος άγνωστα στην ανθρωπότητα. Αυτό σημαίνει επίσης ότι η χρήση τους θα θέσει μια σειρά προκλήσεων στο διεθνές δίκαιο κατά την αντιμετώπιση σχετικών ζητημάτων προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Δεν υπάρχουν «γενικά αποδεκτά διεθνή πρότυπα» για το επίπεδο ασφάλειας των επιβλαβών ουσιών που απορρίπτονται ή εκπέμπονται από ορισμένα πλοία με

εναλλακτικά καύσιμα στο θαλάσσιο περιβάλλον. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλές συζητήσεις αναφορικά με το εάν το LNG μπορεί να θεωρηθεί ως απόλυτο καθαρό καύσιμο και ποια πρότυπα εκπομπών πρέπει να τεθούν για πιθανές διαρροές ή εκπομπές του μεθανίου. Μια έκθεση της Παγκόσμιας Τράπεζας επισημαίνει ότι το LNG διαδραματίζει περιορισμένο μόνο ρόλο στη θαλάσσια απανθρακοποίηση λόγω του προβλήματος διαρροής μεθανίου. Επιπλέον, «σε χρονικούς ορίζοντες 20 και 100 ετών, το μεθάνιο είναι αντίστοιχα 86 φορές και 36 φορές πιο ισχυρό για το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σχέση με το CO₂» (Englert D., et al., 2021). Η χρήση αμμωνίας ως καυσίμου όχι μόνο ενέχει τοξικότητα και κίνδυνο έκρηξης, αλλά μπορεί επίσης να προκαλέσει ατμοσφαιρική ρύπανση, όξινη βροχή, φωτοχημική αιθαλομίχλη και άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω της ανωριμότητας της τρέχουσας τεχνολογίας που σχετίζεται με την καύση αμμωνίας. Αυτές οι ειδικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των θαλάσσιων εναλλακτικών καυσίμων εκτός από τη μείωση του άνθρακα ενδέχεται να δημιουργήσουν δυσκολίες στη διαδικασία εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Υποδεικνύουν επίσης τη δυσκολία στη θέσπιση «γενικά αποδεκτών διεθνών προτύπων» για τη διασφάλιση του επιπέδου ασφάλειας των επιβλαβών ουσιών που απορρίπτονται ή εκπέμπονται από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα (Valera-Medina A., et al., 2018).

Επιπλέον, με την υπάρχουσα τεχνολογία και δεξιότητες, συχνά μπορεί να μην είναι εύκολο να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της θαλάσσιας ρύπανσης που προκαλείται από ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται ορισμένα πλοία με εναλλακτικά καύσιμα. Σε περιπτώσεις διαρροών εναλλακτικών καυσίμων ή θαλάσσιων ατυχημάτων, μπορεί να παρατηρηθούν ορισμένες βραχυπρόθεσμες συνέπειες ρύπανσης, όπως ρύπανση των γύρω υδάτων ή θάνατος ψαριών. Ωστόσο, «περιοριζόμενοι από τις ανεπάρκειες της υπάρχουσας επιστήμης, δεξιοτήτων και τεχνολογίας», πολλά σχετικά με τις μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον παραμένουν άγνωστα. Αυτό συνεπάγεται ότι η ακριβής αξιολόγηση των επιβλαβών ουσιών στον ωκεανό και ο ακριβής προσδιορισμός της μακροπρόθεσμης ζημίας στο θαλάσσιο περιβάλλον ενδέχεται να μην είναι κατανοητός. Οι δυσκολίες στην ακριβή εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη θέσπιση προτύπων εκπομπών για επιβλαβείς ουσίες που απορρίπτονται ή εκπέμπονται που θα μπορούσαν να γίνουν γενικά αποδεκτές μπορεί να επηρεάσουν πολλά ζητήματα

του διεθνούς δικαίου, όπως η λογοδοσία, η δημιουργία νομικής υπόστασης και ο καθορισμός των ποσών αποζημίωσης (Fossi M. C., et al., 2020).

1.5. Ανεπάρκειες στο σύστημα ευθύνης και αποζημίωσης

Η θαλάσσια ρύπανση που προκαλείται από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα μπορεί να εμπλέκει πολλά μέρη, συμπεριλαμβανομένων των κρατών σημαίας, των παράκτιων κρατών, των ιδιοκτητών και των χειριστών πλοίων, των ιδιοκτητών και των χειριστών εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού καυσίμων, των προμηθευτών καυσίμων, των ασφαλιστικών εταιρειών και των συλλόγων προστασίας και αποζημίωσης (P&I). Ο τρόπος κατανομής των ευθυνών σε αυτά τα πολλαπλά μέρη και ο προσδιορισμός του ποιος επωμίζεται τις ευθύνες για τη ρύπανση του θαλάσσιου περιβάλλοντος που προκαλείται από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα αφορά την «περιβαλλοντική δικαιοσύνη για τον ωκεανό» (Rudolph T. B., et al., 2020).

Ωστόσο, εκτός από το ενοποιημένο διεθνές νομικό πλαίσιο για την ευθύνη λόγω πετρελαϊκής ρύπανσης, λείπει ένα ολοκληρωμένο νομικό πλαίσιο για τα πλοία που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα και ενέργεια. Μια σειρά βασικών ζητημάτων σχετικά με την ευθύνη και την αποζημίωση για περιβαλλοντική ζημία παραμένει ασαφής, συμπεριλαμβανομένου του εάν η ευθύνη των πλοιοκτητών και των χειριστών βασίζεται σε πταίσμα. Διοχετεύονται οι υποχρεώσεις αποκλειστικά σε πλοιοκτήτες και χειριστές, όπως σε ένα πυρηνικό ατύχημα; Είναι υπεύθυνος ο προμηθευτής καυσίμων; Σε περίπτωση ατυχήματος κατά την ανεφοδιασμό, πώς κατανέμονται οι ευθύνες; Υπάρχουν υποχρεωτικές απαιτήσεις ασφάλισης; Υπάρχει ανάγκη δημιουργίας ταμείου αποζημιώσεων; Εάν η περιβαλλοντική ζημία είναι τεράστια, το κράτος σημαίας υπόκειται σε συμπληρωματική ευθύνη; Έχει το παράκτιο κράτος πρόσθετη ευθύνη για τη θαλάσσια ρύπανση από εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού καυσίμων; Υπάρχουν περιορισμοί στην ευθύνη; Ενώ οι υπάρχουσες συμβάσεις αερίων καυσίμων έχουν εισαγάγει δεσμευτικούς κανονισμούς για τη χρήση αερίων και άλλων καυσίμων χαμηλού σημείου ανάφλεξης, αυτά τα μέτρα αφορούν κυρίως την ασφάλεια των πλοίων παρά την ευθύνη και την αποζημίωση. Αν και αρκετές συμβάσεις πυρηνικής ευθύνης ορίζουν ευθύνη και αποζημίωση, ορισμένοι μελετητές αντιτίθενται σε μια ευρεία ερμηνεία αυτών των συμβάσεων για μεταφερόμενα πυρηνικά πλοία ή πλατφόρμες (Handrlica, 2019). Ως εκ τούτου, είναι αρκετά αμφιλεγόμενο εάν οι συμβάσεις ευθύνης μπορούν να εφαρμοστούν σε πυρηνικά πλοία ή πλωτές πυρηνικές

πλατφόρμες. Το πλαίσιο ευθύνης και αποζημίωσης για τα βιοκαύσιμα και τα ηλεκτρικά πλοία λείπει ακόμη περισσότερο. Αν και η Σύμβαση HNS θεσπίζει το σχετικό σύστημα ευθύνης και αποζημίωσης λόγω ρύπανσης για μεγάλο αριθμό ουσιών, δεν έχει ακόμη τεθεί σε ισχύ και γενικά θεωρείται ότι εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση μεταφοράς HNS ως φορτίου. Ο βαθμός στον οποίο εφαρμόζεται στα καύσιμα πλοίων παραμένει αμφιλεγόμενος (Valera-Medina A., et al., 2018).

Εκτός από τα προβλήματα στην επιδίωξη ευθύνης και αποζημίωσης βάσει των υφιστάμενων διεθνών συμβάσεων, το πιθανό δίλημμα της νομικής ελάφρυνσης μπορεί να φανεί με βάση προηγούμενα δικαστικά προηγούμενα, ειδικά όταν η ζημιά είναι τεράστια και οι σχετικές χώρες καλούνται να φέρουν συμπληρωματική κρατική ευθύνη. Για διασυννοριακή περιβαλλοντική αποζημίωση, η απαιτούμενη ζημιά απαιτείται συχνά να είναι «σημαντική ζημιά» ή «υλική ζημιά», όπως κρίθηκε στην υπόθεση Trail Smelter (1941) και στην υπόθεση Lake Lanoux (1957). Η απλή εμφάνιση του «κινδύνου πιθανής ζημιάς» δεν είναι «αρκετή για να δικαιούστε νομική αρωγή» (Xue, 2003). Επιπλέον, η υπόθεση Bering Sea Fur Seals Fisheries (1893) και η υπόθεση Nuclear Tests (1974) έθεσαν το ζήτημα του «αν ένα κράτος μπορούσε να ασκήσει περιβαλλοντική αξίωση για να αποτρέψει τη ζημιά σε μια περιοχή πέρα από την εθνική δικαιοδοσία» (Sands P., et al., 2018). Η απαίτηση από τα θιγόμενα μέρη να αποδείξουν ότι έχουν νομική υπόσταση στην αξίωση θα μπορούσε να δημιουργήσει δυσκολίες για αξιώσεις και διορθωτικά μέτρα για τη θαλάσσια ρύπανση που προκαλείται από πλοία που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα σε περιοχές εκτός της εθνικής δικαιοδοσίας ενός κράτους. Επιπλέον, περιορισμένη από το τρέχον επίπεδο επιστήμης, τεχνολογίας και δεξιοτήτων, η ακριβής ζημιά μπορεί να είναι δύσκολο να εκτιμηθεί και επί του παρόντος δεν υπάρχουν διεθνώς αναγνωρισμένα ενιαία πρότυπα και ειδικές κατευθυντήριες γραμμές για ακριβείς εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτή η κατάσταση μπορεί επίσης να δημιουργήσει προκλήσεις για τα διεθνή δικαστικά όργανα κατά την εκδίκαση αξιώσεων θαλάσσιας ρύπανσης που αφορούν πλοία με εναλλακτικά καύσιμα.

1.6. Ανεπαρκής διεθνής συνεργασία για την πρόληψη και αντιμετώπιση της ρύπανσης

Η συνεργασία μεταξύ των κρατών είναι ζωτικής σημασίας όταν εμφανίζεται μεγάλης κλίμακας θαλάσσια ρύπανση (Churchill R., et al., 2022). Η αντιμετώπιση της

θαλάσσιας ρύπανσης από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα απαιτεί επίσης εκτεταμένη συνεργασία από τη διεθνή κοινότητα. Η UNCLOS (άρθρα 198 – 199) παρέχει ένα γενικό πλαίσιο για διεθνή συνεργασία για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, απαιτώντας από τα κράτη που έχουν επίγνωση του «επικείμενου κινδύνου για το θαλάσσιο περιβάλλον» να ειδοποιήσουν τα πληγέντα κράτη και τους αρμόδιους διεθνείς οργανισμούς και να συνεργαστούν για την «εξάλειψη των επιπτώσεων της ρύπανσης και την πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση της ζημίας» (UNCLOS, 1982). Ειδικότερα, το πρωτόκολλο OPRC-HNS του 2000 αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ειδικού παγκόσμιου πλαισίου για την προώθηση της διεθνούς συνεργασίας για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης που προκαλείται από τα HNS. Ωστόσο, ορισμένα από τα μέτρα ανταπόκρισής του ή ακόμα και το «οργανωτικό πλαίσιο για διοίκηση, έλεγχο και συντονισμό» ακολουθεί τις αρχές της Διεθνούς Σύμβασης για την ετοιμότητα, την απόκριση και τη συνεργασία για τη ρύπανση από πετρέλαιο (Convention, 2018). Έχει τεθεί το ερώτημα εάν «οι συμβατικοί πόροι που έχουν δημιουργηθεί για την αντιμετώπιση πετρελαιοκηλίδων μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμοι σε πολλές διαρροές HNS». Επιπλέον, ο περιορισμένος αριθμός συμβαλλόμενων μερών στο πρωτόκολλο OPRC-HNS, το οποίο επί του παρόντος έχουν επικυρώσει μόνο 41 κράτη, μπορεί να περιορίσει την πρακτική λειτουργία του πρωτοκόλλου για την προώθηση της παγκόσμιας συνεργασίας για την αντιμετώπιση της μεγάλης κλίμακας θαλάσσιας ρύπανσης που προκαλείται από HNS.

Εκτός από την ανεπάρκεια της διακρατικής συνεργασίας, το υπάρχον διεθνές νομικό πλαίσιο είναι ανεπαρκές για την προώθηση της συνεργασίας από τον ιδιωτικό τομέα για την από κοινού αντιμετώπιση της θαλάσσιας ρύπανσης που προκαλείται από πλοία με εναλλακτικά καύσιμα, την αποτελεσματική επίτευξη επιμερισμού και μεταφοράς κινδύνου και την ενίσχυση της αποζημίωσης χωρητικότητα. Ο ασφαλιστικός κλάδος και το σύστημα αμοιβαίας ασφάλισης για τους κλάδους της ναυτιλίας και της ενέργειας μπορούν αποτελεσματικά να μοιραστούν και να μεταφέρουν τους κινδύνους για ατυχήματα ρύπανσης, διευκολύνοντας τα θύματα να λάβουν αποζημίωση. Αυτοί οι μηχανισμοί αποζημίωσης από τον ιδιωτικό τομέα, επομένως, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην εκ των υστέρων ανακούφιση από ατυχήματα λόγω ρύπανσης. Στο Σχέδιο Αρχών της Επιτροπής Διεθνούς Δικαίου σχετικά με την κατανομή της απώλειας σε περίπτωση διασυνοριακής ζημίας που προκύπτει από επικίνδυνες δραστηριότητες, η ασφάλιση και τα «κεφάλαια σε όλη τη βιομηχανία» έχουν προταθεί

ως εφικτά μέτρα για τη διασφάλιση «άμεσης και επαρκούς αποζημίωσης» για διασυνοριακές ζημίες που προκύπτουν από επικίνδυνες δραστηριότητες (International Law Commission , 2006). Αν και η υποχρεωτική ασφάλιση προβλέπεται στις συμβάσεις πυρηνικής ευθύνης και στη σύμβαση HNS, η δυνατότητα εφαρμογής αυτών των συμβάσεων σε πλοία με εναλλακτικά καύσιμα συζητείται επί του παρόντος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Υπάρχει επίσης μια σειρά αναδυόμενων ζητημάτων που πρέπει να επιλυθούν, όπως εάν οι πλοιοκτήτες που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα για την πρόωση πλοίων πρέπει να έχουν υποχρεωτική ασφάλιση, εάν το κράτος σημαίας πρέπει να υποχρεωθεί να αναλάβει συμπληρωματική οικονομική ασφάλεια και εάν η «σημαία της ευκολίας» μπορεί να υπονομεύσει τη συμπληρωματική οικονομική ασφάλεια του κράτους. Υπό αυτή την έννοια, τα πλοία με εναλλακτικά καύσιμα και οι ειδικοί περιβαλλοντικοί κίνδυνοι τους ενδέχεται να θέτουν πολλές νέες προκλήσεις στην αλληλεπίδραση και τη συνεργασία μεταξύ του ασφαλιστικού κλάδου, των ενεργειακών βιομηχανιών και των θαλάσσιων μεταφορών.

Κεφάλαιο 2: Περιγραφή των συμβατικών καυσίμων και μηχανών μετατροπής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ναυτιλίας

Πάνω από το 90 % του παγκόσμιου εμπορίου μεταφέρεται στους ωκεανούς του κόσμου με περίπου 90.000 θαλάσσια πλοία. Όπως όλα τα μέσα μεταφοράς που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, τα πλοία παράγουν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που συμβάλλουν σημαντικά στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή και στην οξίνιση. Εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα, τα πλοία απελευθερώνουν επίσης άλλους ρύπους που συμβάλλουν στο πρόβλημα. Η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι υπεύθυνη για ένα σημαντικό ποσοστό του παγκόσμιου προβλήματος της κλιματικής αλλαγής. Πάνω από το 3% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να αποδοθεί σε ποντοπόρα πλοία. Αυτό είναι ένα ποσό συγκρίσιμο με τις μεγάλες χώρες που εκπέμπουν άνθρακα και η βιομηχανία συνεχίζει να αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς (Gallucci, 2018).

Στην πραγματικότητα, αν η παγκόσμια ναυτιλία ήταν μια χώρα, θα ήταν ο έκτος μεγαλύτερος παραγωγός εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Μόνο οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Κίνα, η Ρωσία, η Ινδία και η Ιαπωνία εκπέμπουν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα από τον παγκόσμιο ναυτιλιακό στόλο. Ωστόσο, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τα ωκεάνια πλοία είναι επί του παρόντος ανεξέλεγκτες. Τα πλοία συνεισφέρουν σημαντική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Τα φορτηγά πλοία είναι σημαντικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης παγκοσμίως και το μαζούτ τους ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό. Κατάμαυρο και παχύρρευστο, το καύσιμο «bunker» κατασκευάζεται από τα υπολείμματα της διαδικασίας διύλισης του πετρελαίου. Είναι επίσης επιβαρυνμένο με θείο, τη χημική ουσία που, όταν καίγεται, παράγει επιβλαβή αέρια και λεπτά σωματίδια που μπορούν να βλάψουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, ειδικά κατά μήκος περιοχών με μεγάλη διακίνηση. Καθώς περισσότερα στοιχεία έφεραν στην επιφάνεια τους κινδύνους της καύσης βαρέων καυσίμων, η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία ξεκίνησε μια σημαντική αναμόρφωση του εφοδιασμού της σε καύσιμα (IMO, 2018). Από την 1η Ιανουαρίου 2020, ο IMO απαίτησε όλα τα καύσιμα που θα χρησιμοποιούνται στα πλοία να μην περιέχουν περισσότερο από 0,5% θείο. Το ανώτατο όριο είναι μια σημαντική μείωση από το υπάρχον όριο θείου του 3,5% και είναι πολύ κάτω από τον μέσο όρο της βιομηχανίας του 2,7% περιεκτικότητας σε θείο. Οι ειδικοί στη δημόσια υγεία έκαναν την εκτίμηση

ότι από τη στιγμή που θα τεθεί σε ισχύ το όριο του θείου, θα αποτρέψει περίπου 150.000 πρόωρους θανάτους και 7,6 εκατομμύρια περιπτώσεις παιδικού άσθματος παγκοσμίως κάθε χρόνο (IMO, 2021). Οι ναυτιλιακές ρυθμιστικές αρχές άρχισαν να συζητούν τα επιβλαβή καυσαέρια των πλοίων το 1973, στην πρώτη σύμβαση MARPOL (συντομογραφία για τη «θαλάσσια ρύπανση»). Αλλά μόλις το 1997 ο IMO υιοθέτησε το Παράρτημα VI, το οποίο καθόριζε όρια στις εκπομπές οξειδίου του θείου και οξειδίου του αζώτου από ποντοπόρα πλοία. Οκτώ χρόνια αργότερα, αυτά τα όρια τέθηκαν σε ισχύ, με ανώτατο όριο θείου 3,5% για το 2012 και ανώτατο όριο 0,5% για το 2020. Από εκείνη την εποχή, η παγκόσμια ναυτιλιακή δραστηριότητα συνέχισε να αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι πληθυσμοί και οι οικονομίες επεκτείνονται. Τα φορτηγά πλοία εκφόρτωσαν περίπου 10,3 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους αγαθών παγκοσμίως το 2016, αύξηση 300 % σε σχέση με τους όγκους του 1970, σύμφωνα με τις εμπορικές στατιστικές του ΟΗΕ. Σήμερα, η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι ένας από τους μεγαλύτερους κλάδους εκπομπής οξειδίων του θείου στον κόσμο, πίσω από τον κλάδο της ενέργειας (Evangelista, 2002).

Περίπου το 70 % των εκπομπών της ναυτιλιακής βιομηχανίας λαμβάνουν χώρα σε 250 μίλια ξηράς, εκθέτοντας εκατοντάδες εκατομμύρια ανθρώπους σε επιβλαβείς ρύπους. Ωστόσο, τα φορτηγά πλοία, σε βιομηχανικά λιμάνια ή κρουαζιέρες μακριά από τις θαλάσσιες ακτές, είναι συχνά εκτός οπτικού πεδίου, αφήνοντας το κοινό να αγνοεί τους κινδύνους για την υγεία που δημιουργούν οι εκπομπές από τη ναυτιλία. Τα οξείδια του θείου (SO_x) μπορούν να βλάψουν το αναπνευστικό σύστημα των ανθρώπων και να προκαλέσουν αναπνευστικές δυσκολίες, ιδιαίτερα σε παιδιά, ηλικιωμένους και πάσχοντες από άσθμα. Η ρύπανση από θείο συμβάλλει επίσης στα αιωρούμενα σωματίδια (PM), τα μικροσκοπικά σωματίδια που εισέρχονται στην κυκλοφορία του αίματος και βλάπτουν τους πνεύμονες και την καρδιά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καρδιακές προσβολές, επιδεινωμένο άσθμα, αυξημένες εισαγωγές στο νοσοκομείο και πρόωρους θανάτους. Τα ανώτατα όρια θείου έχουν ήδη αποδειχθεί αποτελεσματικά σε ορισμένες περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής, όπου οι κυβερνήσεις έχουν δημιουργήσει Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών. Σε αυτές τις ζώνες, τα φορτηγά πλοία υποχρεούνται να χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλής ή εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο καθώς πλησιάζουν την ακτογραμμή. Επειδή όμως αυτά τα καθαρότερα καύσιμα είναι πιο ακριβά, τα πλοία συχνά επιστρέφουν στην καύση φθηνών καυσίμων όταν φύγουν από τα καθορισμένα ύδατα (Gallucci, 2018).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στις 16 Δεκεμβρίου 2022 ενέκρινε τη συμφωνία που επιτεύχθηκε από τον IMO για την ενίσχυση της προστασίας της Μεσογείου, με σημαντική αυστηροποίηση των κανόνων για τα καυσαέρια από τα πλοία. Αυτός ο χαρακτηρισμός της Μεσογείου ως Περιοχής Ελέγχου Εκπομπών για τα οξείδια του θείου (SECA) θα μειώσει τελικά τις εκπομπές αυτών των αερίων κατά σχεδόν 80%, και επίσης θα μειώσει τις εκπομπές επιβλαβούς λεπτής σκόνης (PM_{2,5}) κατά σχεδόν ένα τέταρτο, με σημαντικά οφέλη για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η πρωτοβουλία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της Σύμβασης της Βαρκελώνης από τα κράτη της Μεσογείου και την ΕΕ και έχει υποβληθεί από κοινού στον IMO. Είναι ένα πολύ καλό παράδειγμα επιτυχημένης διεθνούς συνεργασίας που κατέστη δυνατή χάρη στις περιφερειακές θαλάσσιες συμβάσεις.

Ο χαρακτηρισμός της Μεσογείου ως περιοχής ελέγχου εκπομπών σημαίνει ότι από την 1η Μαΐου 2025 τα πλοία θα πρέπει να χρησιμοποιούν καύσιμα πλοίων με μειωμένη περιεκτικότητα σε θείο. Η επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε θείο θα μειωθεί από το τρέχον όριο του 0,5% στο 0,1%. Αυτή η πτώση θα αποσοβήσει τουλάχιστον 1000 πρόωρους θανάτους ετησίως και θα μειώσει τα νέα κρούσματα παιδικού άσθματος έως το 2000 κάθε χρόνο στη λεκάνη της Μεσογείου. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η ΕΕ έχει δεσμευτεί για την απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα και την απορρύπανση όλων των τομέων, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων μεταφορών. Στο πλαίσιο του σχεδίου δράσης για τη μηδενική ρύπανση και της στρατηγικής της ΕΕ για τη βιώσιμη και έξυπνη κινητικότητα, η Επιτροπή στοχεύει να επεκτείνει την προστασία από την ατμοσφαιρική ρύπανση της ναυτιλίας σε όλα τα ύδατα της ΕΕ. Περιοχές ελέγχου των εκπομπών για το θείο υπάρχουν ήδη στη Βόρεια Θάλασσα και τη Βαλτική Θάλασσα, όπου έχουν αποδειχθεί πολύ επιτυχημένες. Οι περιοχές ελέγχου εκπομπών για τα οξείδια του αζώτου σε αυτές τις δύο θάλασσες έχουν τεθεί σε ισχύ το 2021. Η Επιτροπή θα συνεχίσει να συμβάλλει στις προετοιμασίες για την εφαρμογή της Μεσογειακής SECA που θα πρέπει να ξεκινήσει αμέσως. Ομοίως, η Επιτροπή θα συνεχίσει επίσης να υποστηρίζει μελλοντικές πρωτοβουλίες από τα παράκτια κράτη της ΕΕ με στόχο τη δημιουργία πρόσθετων ΕΕΣ για την κάλυψη όλων των υδάτων της ΕΕ, μεταξύ άλλων μέσω περιφερειακών θαλάσσιων συμβάσεων (European Commission, 2022).

2.1. Χρήση βαρέως μαζούτ (HFO)

Οι προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών από τα πλοία συμπεριλαμβανομένων αυστηρότερων κανονισμών σχετικά με το επιτρεπόμενο επίπεδο θείου στα καύσιμα πλοίων περιορίζουν τη χρήση βαρέως μαζούτ (HFO) στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Μέχρι πρόσφατα, τα περισσότερα ποντοπόρα πλοία χρησιμοποιούσαν HFO για να τροφοδοτήσουν τις μηχανές τους. Το καύσιμο ήταν τόσο δημοφιλές που, σύμφωνα με την τρίτη μελέτη αερίων θερμοκηπίου του IMO, το HFO αποτελούσε το 86% των καυσίμων σε πλοία. Από τα μέσα του 19ου αιώνα, το HFO ήταν μια λογική επιλογή για τα πλοία, λόγω της υψηλής ενεργειακής του πυκνότητας και του χαμηλού κόστους. Το HFO είναι φθηνότερο από άλλα καύσιμα επειδή αποτελεί το υπολειμματικό προϊόν από τη διαδικασία διύλισης του πετρελαίου. Η διύλιση παράγει και άλλα καύσιμα όπως τη βενζίνη και το ντίζελ, που ονομάζονται αποστάγματα, για χρήση σε αυτοκίνητα, φορτηγά, αεροπλάνα και μικρότερα πλοία, αφήνοντας στον πυθμένα της αποστακτικής στήλης το HFO (World Maritime News, 2019).

Σε αντίθεση με άλλα καύσιμα, το HFO είναι παχύρευστο και πρέπει να ζεσταθεί για να ρέει ελεύθερα για χρήση στις μηχανές του πλοίου. Και δυστυχώς, το καύσιμο περιέχει πολλές ακαθαρσίες, συμπεριλαμβανομένου του θείου. Το θείο στο καύσιμο βοηθά στη λίπανση του κινητήρα, αλλά μόλις καεί, μετατρέπεται σε ατμοσφαιρικό ρύπο, τα οξειδία του θείου (SOx). Αν και δεν είναι η μόνη πηγή, η ναυτιλία εκτιμάται ότι συμβάλλει στο 13% των συνολικών εκπομπών οξειδίων του θείου στον κόσμο. Αυτοί οι ατμοσφαιρικοί ρύποι από τα πλοία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή βλάβη στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Ο IMO συνεργάζεται με τη ναυτιλιακή βιομηχανία για την εφαρμογή μέτρων για τη μείωση της ρύπανσης από οξειδία του θείου. Για να τηρηθεί το όριο περιεκτικότητας σε θείο 0,5% του IMO 2020, τα πλοία μπορούν να καίνε βαρύ μαζούτ με μειωμένη περιεκτικότητα σε θείο ή να στραφούν σε πετρέλαιο εσωτερικής καύσης χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο ή υγροποιημένο φυσικό αέριο. Εναλλακτικά, τα πλοία μπορούν να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν HFO εάν έχουν εγκαταστήσει ένα σύστημα καθαρισμού καυσαερίων για τον καθαρισμό (εξ ου και ο όρος πλυντρίδες ή scrubbers) των οξειδίων του θείου από τα καυσαέρια πριν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Αν και οι πλυντρίδες έχουν εγκριθεί από τον IMO ως μέσο συμμόρφωσης και αναμένεται να πληρούν τις διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές, οι πλυντρίδες αποτελούν πηγή διαμάχης λόγω των αποβλήτων που παράγουν

και των πιθανών επιπτώσεων που θα μπορούσαν να έχουν αυτά τα απόβλητα στον ωκεανό (Eurostat, 2021).

Ένας άλλος ρύπος που δημιουργείται μέσω της ατελούς καύσης του HFO είναι μια μαύρη αιθάλη που αποτελείται από σωματιδιακή ύλη. Κάποια από την αιθάλη ονομάζεται «μαύρος άνθρακας», σωματίδια που απορροφούν το φως του ήλιου ενώ διαχέονται στον αέρα και σκουραίνουν τον πάγο και το χιόνι όταν πέφτουν στη γη, συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη μειώνοντας την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που ανακλάται στο διάστημα (το φαινόμενο albedo) και αυξάνοντας τον ρυθμό τήξης των πάγων σε πολικές περιοχές. Το μεγαλύτερο μέρος του μαύρου άνθρακα προέρχεται από φυσικές πηγές όπως οι δασικές πυρκαγιές και η ηφαιστειακή δραστηριότητα και άλλες ανθρωπογενείς πηγές, όπως οι εκπομπές οχημάτων και η βιομηχανική παραγωγή. Ο μαύρος άνθρακας εκτιμάται ότι έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην υπερθέρμανση του πλανήτη, μετά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Ibrahim Dincer & Bicer, 2018).

Με την αυξανόμενη διαθεσιμότητα άλλων επιλογών καυσίμων και με το λιώσιμο του πάγου να ανοίγει νέες διαδρομές στην Αρκτική, αυξάνεται η πίεση για την απαγόρευση του HFO σε αυτό το απομακρυσμένο και εύθραυστο οικοσύστημα. Εάν χυθεί στην Αρκτική, το HFO θα ήταν δύσκολο να καθαριστεί λόγω της φύσης του πετρελαίου και της έλλειψης υποδομών και πόρων για την αντιμετώπιση διαρροών. Το HFO έχει απαγορευτεί στην Ανταρκτική από το 2011. Η απαγόρευση του HFO στην Αρκτική θα μειώσει την περιβαλλοντική βλάβη από τη δημιουργία μαύρου άνθρακα όταν καίγεται HFO καθώς επίσης θα εξαλείψει τον κίνδυνο διαρροών. Ωστόσο, τα περιβαλλοντικά οφέλη πρέπει να σταθμιστούν έναντι των πιθανών οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων σε όσους βασίζονται σε πλοία για να μεταφέρουν τρόφιμα και προμήθειες στην Αρκτική. Ο κανονισμός 43A του παραρτήματος I MARPOL τέθηκε σε ισχύ την 1η Νοεμβρίου 2022 και απαγορεύει τη χρήση και τη μεταφορά βαρέως μαζούτ ως καύσιμο από πλοία που εκτελούν δρομολόγια στα ύδατα της Αρκτικής από την 1η Ιουλίου 2024. Ωστόσο, επιτρέπονται εξαιρέσεις για πλοία με προστατευμένες δεξαμενές καυσίμων ενώ μπορεί να εκδοθεί από παράκτια κράτη της Αρκτικής άδεια για πλοία που φέρουν τη σημαία τους ενώ επιχειρούν σε ύδατα που υπόκεινται στην κυριαρχία ή τη δικαιοδοσία τους έως την 1η Ιουλίου 2029 (Humpert, 2022).

Από τα μέσα του 19ου αιώνα, το HFO ήταν το βασικό καύσιμο της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Σήμερα, αυτή η θέση αλλάζει μετά από αυστηρότερους κανονισμούς σχετικά με τα επιτρεπόμενα επίπεδα θείου στα καύσιμα πλοίων. Οι παραγωγοί καυσίμων βρίσκουν τρόπους να μειώσουν την περιεκτικότητα του θείου στο HFO είτε αναμειγνύοντάς το με ελαφρύτερα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο είτε αφαιρώντας το θείο κατά τη διύλιση μέσω της διεργασίας της υδρογονοαποθείωσης. Η κατασκευή και η προμήθεια καυσίμων για πλοία είναι μια περίπλοκη υπόθεση, ιδίως ως αποτέλεσμα της πανδημίας COVID-19 και της συνακόλουθης οικονομικής επιβράδυνσης. Το HFO δεν αναμένεται να αφανιστεί εντελώς ειδικά για εκείνα τα πλοία που είναι εξοπλισμένα με πλυντρίδες. Ωστόσο, οι πλυντρίδες μπορεί να μην είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση εάν η τιμή των καυσίμων με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο συνεχίσει να πέφτει, μειώνοντας το πλεονέκτημα τιμής που είχε το HFO. Επιπλέον, οι προσπάθειες του IMO και της ναυτιλιακής βιομηχανίας να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έως το έτος 2050 στο 50% των επιπέδων του 2008 θα ασκήσουν περαιτέρω πίεση για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η βιομηχανία εξερευνά άλλες πηγές ενέργειας όπως κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες, ηλιακή και αιολική ενέργεια είτε ως μοναδική πηγή ενέργειας είτε σε συνδυασμό με άλλα συστήματα για να παρέχεται πρόωση στα πλοία (Ibrahim Dincer & Bicer, 2018).

2.2. Χρήση αργού πετρελαίου

Η γενικώς αποδεκτή θεωρία είναι ότι το αργό πετρέλαιο σχηματίστηκε σε εκατομμύρια χρόνια από υπολείμματα φυτών και ζώων που ζούσαν στις θάλασσες. Καθώς πέθαιναν, βυθίστηκαν στον βυθό, θάφτηκαν με άμμο και λάσπη και έγιναν ένα πλούσιο σε οργανική ύλη στρώμα. Σταθερά, αυτά τα στρώματα συσσωρεύονταν, φτάνοντας το πάχος δεκάδων μέτρων. Η άμμος και η λάσπη έγιναν ιζηματογενές πέτρωμα και τα οργανικά υπολείμματα έγιναν σταγονίδια πετρελαίου και αερίου. Το πετρέλαιο και το αέριο πέρασαν μέσα από το πορώδες πέτρωμα και τελικά παγιδεύτηκαν από ένα αδιαπέραστο στρώμα βράχου, που μαζεύτηκε στο υψηλότερο σημείο. Το πιο σημαντικό είναι ότι αυτοί οι τέσσερις παράγοντες πρέπει να συμβούν στον σωστό χρόνο, τόπο και με τη σωστή σειρά για να σχηματιστεί και να παγιδευτεί το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Επί του παρόντος, η επιτυχημένη εξερεύνηση πετρελαίου βασίζεται σε σύγχρονες τεχνικές όπως η σεισμική έρευνα. Η θεμελιώδης αρχή της

σεισμικής αποτύπωσης είναι να εκκινεί έναν σεισμικό παλμό στην επιφάνεια της γης ή κοντά στην επιφάνεια της γης και να καταγράφει τα πλάτη και τους χρόνους διαδρομής των κυμάτων που επιστρέφουν στην επιφάνεια μετά την ανάκλαση ή τη διάθλασή τους από τη διεπαφή(ες) μεταξύ ενός ή περισσότερων πετρωμάτων. Μόλις ληφθούν σεισμικά δεδομένα, πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία σε μορφή κατάλληλη για γεωλογική ερμηνεία και ανίχνευση κοιτάσματος πετρελαίου (Evangelista, 2002).

Το αργό πετρέλαιο είναι ένα μείγμα πολλών διαφορετικών υδρογονανθράκων και μικρών ποσοτήτων ακαθαρσιών. Η σύνθεση του αργού πετρελαίου μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την πηγή του. Τα αργά πετρέλαια από την ίδια γεωγραφική περιοχή μπορεί να είναι πολύ διαφορετικά. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες υδρογονανθράκων. Αυτά βασίζονται στον τύπο των δεσμών άνθρακα-άνθρακα που υπάρχουν. Αυτές οι κατηγορίες είναι: Οι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες που περιέχουν μόνο απλούς δεσμούς άνθρακα-άνθρακα. Είναι γνωστοί ως παραφίνες (ή αλκάνια) εάν είναι άκυκλα, ή ναφθένια (ή κυκλοαλκάνια) εάν είναι κυκλικά. Οι ακόρεστοι υδρογονάνθρακες περιέχουν πολλαπλούς δεσμούς άνθρακα-άνθρακα (διπλούς, τριπλούς ή και τους δύο). Αυτά είναι ακόρεστα επειδή περιέχουν λιγότερα υδρογόνα ανά άνθρακα από τις παραφίνες. Οι ακόρεστοι υδρογονάνθρακες είναι γνωστοί ως ολεφίνες. Αυτά που περιέχουν διπλό δεσμό άνθρακα-άνθρακα ονομάζονται αλκένια, ενώ αυτά με τριπλό δεσμό άνθρακα-άνθρακα είναι τα αλκίνια. Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι ειδική κατηγορία κυκλικών ενώσεων που περιλαμβάνουν στη δομή τους βενζολικό δακτύλιο (Shaw, 2017).

Όλα τα IFO έχουν καλά χαρακτηριστικά ανάφλεξης, λόγω του υψηλού ποσοστού παραφινών που εξακολουθούν να υφίστανται στα υπολείμματα της ατμοσφαιρικής απόσταξης σε ένα διυλιστήριο. Η υψηλή ποσότητα παραφινικών υδρογονανθράκων στα καύσιμα πλοίων οδηγεί σε σχετικά χαμηλές πυκνότητες για αυτά τα προϊόντα, εξασφαλίζοντας εύκολο και αποτελεσματικό καθαρισμό καυσίμου επί του σκάφους. Η αναλογία καυσίμων που μπορεί να προκύψει από τη διύλιση πετρελαίου, δεν αντιστοιχεί στη ζήτηση καυσίμων προϊόντων στις βιομηχανικές χώρες, όπου η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ελαφρά προϊόντα (καύσιμα αεροπλοϊάς, βενζίνη και ντίζελ) συμπίπτει με έντονη μείωση της ζήτησης βαρέων καυσίμων (10 έως 15% του αργού πετρελαίου). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη μετατροπής των βαριών κλασμάτων του πετρελαίου σε ελαφρύτερα, επομένως, πιο πολύτιμα κλάσματα και στην κατασκευή αυξημένης πολυπλοκότητας διυλιστηρίων. Ένα σύνθετο σχήμα

επεξεργασίας διυλιστηρίου μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: Απόσταξη αργού πετρελαίου (ατμοσφαιρική απόσταξη και απόσταξη κενού) και Ρεύματα από τη μονάδα απόσταξης κενού μετατρέπονται μέσω διαδικασιών καταλυτικής και θερμικής πυρόλυσης σε ελαφρά προϊόντα. Τα σύνθετα διυλιστήρια ευνοούνται από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 και προορίζονται να ενισχύσουν την παραγωγή βενζίνης. Τα κύρια συστατικά ανάμειξης θαλάσσιων καυσίμων από διυλιστήριο καταλυτικής πυρόλυσης ρευστοποιημένης κλίνης (FCC) είναι τα ίδια αποστάγματα με εκείνα από διυλιστήριο ευθείας λειτουργίας (ελαφρύ και βαρύ ντίζελ) καθώς και ατμοσφαιρικό ελαφρύ αερίελλο (LC(G)O) και βαρύ αερίελλο (HCO). Τα προϊόντα του πυθμένα της ατμοσφαιρικής απόσταξης χρησιμοποιούνται ως τροφοδοσία στην μονάδα απόσταξης κενού και σπάνια διατίθενται προς ανάμιξη με εμπορικά καύσιμα. Τα καύσιμα πλοίων που προκύπτουν από ένα διυλιστήριο καταλυτικής πυρόλυσης/ιζωδόλυσης έχουν μία σύσταση που διαφέρει σημαντικά από εκείνη ενός διυλιστηρίου μόνο με στήλη ατμοσφαιρικής απόσταξης. Λόγω της υψηλής αρωματικής φύσης του LC(G)O, η πυκνότητα ενός πετρελαίου για πλοία αναμεμιγμένο με LC(G)O θα είναι υψηλότερη από ό,τι όταν χρησιμοποιείται πετρέλαιο από διυλιστήριο ατμοσφαιρικής απόσταξης. Η πυκνότητα θα είναι τυπικά κοντά στα 860 kg/m^3 (στους 15°C). Το 2010, η τέταρτη έκδοση του προτύπου ISO 8217 εισήγαγε μια πρόσθετη κατηγορία πετρελαίου για πλοία, το DMZ, το οποίο έχει υψηλότερο ελάχιστο ιζώδες από το DMA, αλλά είναι κατά τα άλλα πανομοιότυπο ως προς τα χαρακτηριστικά του με το πετρέλαιο DMA. Πολλές χώρες επιβάλλουν τη χρήση βιοντίζελ στο καύσιμο ντίζελ για τις οδικές μεταφορές. Το 2017, η έκτη έκδοση του προτύπου ISO 8217 εισήγαγε δύο επιπλέον ποιότητες πετρελαίου για πλοία, τα DFA και DFZ, με μέγιστη περιεκτικότητα σε μεθυλεστέρες (FAME) λιπαρών οξέων 7,0 % κατ' όγκο (βλ. επίσης Κεφάλαιο III-8 για τα βιοκαύσιμα). Σημείωση: Σε ορισμένες περιοχές το πετρέλαιο πετρελαίου ναυτιλίας DMA είναι, στην πραγματικότητα, ντίζελ αυτοκινήτων (μη συμπεριλαμβανομένου του βιοντίζελ), με πρόσθετο δείκτη και βαφή και χωρίς τον ειδικό φόρο κατανάλωσης που ισχύει για τα καύσιμα αυτοκινήτων. Στην ΕΕ, το μέγιστο επίπεδο S του ντίζελ αυτοκινήτων είναι επί του παρόντος 0,0010 % κατά μάζα ή 10 ppm. Η αλκαλικότητα (BN) του λιπαντικού μπορεί να πρέπει να ρυθμιστεί ανάλογα (βλ. επίσης Κεφάλαιο III-2a για το θείο).

Το ναυτιλιακό ντίζελ με εμπορική ονομασία Distillate marine diesel (MDO/DMB/DFB) έχει συνήθως χαμηλότερο δείκτη κετανίου από το πετρέλαιο για

πλοία και έχει υψηλότερη πυκνότητα. Με την παραγωγή ενός διυλιστηρίου καταλυτικής πυρόλυσης, το αποσταγμένο ντίζελ μπορεί επομένως να περιέχει υψηλότερο ποσοστό LC(G)O από το πετρέλαιο θαλάσσης. Το 2017, η έκτη έκδοση του προτύπου ISO 8217 εισήγαγε ένα πρόσθετο απόσταγμα ντίζελ, το DFB, με μέγιστη περιεκτικότητα σε μεθυλεστέρες (FAME) λιπαρών οξέων 7,0 % κατ' όγκο (βλ. επίσης Κεφάλαιο III-8 για το βιοντίζελ). Το καύσιμο IFO-380 (θείο > 0,50% μέγιστο) συνήθως περιέχει υπολείμματα ιξωδόλυσης, HCO και LC(G)O. Αυτά τα τρία συστατικά επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του IF-380 (Eurostat, 2021).

Τα δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην αλυσίδα αξίας της ενέργειας. Ο κύριος ρόλος τους είναι να μεταφέρουν αργό πετρέλαιο από το σημείο παραγωγής στο διυλιστήριο, αν και μερικές φορές χρησιμοποιούνται και για την αποθήκευση αργού πετρελαίου μετά την παραγωγή. Τα δεξαμενόπλοια αργού μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά προϊόντων πετρελαίου όπως το μαζούτ. Οποιαδήποτε καθαρά προϊόντα βγαίνουν από το διυλιστήριο μεταφέρονται σε δεξαμενόπλοια «καθαρά» ή «προϊόντα», τα οποία είναι μικρότερα σε μέγεθος (Europan, 2017). Τα πετρελαιοφόρα Asset Crude διατίθενται σε διάφορα μεγέθη, με το μεγαλύτερο τυπικό μέγεθος να είναι ένα Very Large Crude Carrier – ή «VLCC». Αυτά τα δεξαμενόπλοια μπορούν να μεταφέρουν έως και 2 εκατομμύρια βαρέλια αργού πετρελαίου ανά αποστολή, ενώ το δεύτερο μεγαλύτερο μέγεθος είναι το «Suezmax» που παίρνει περίπου το ήμισυ αυτής της ποσότητας και είναι το μεγαλύτερο πλοίο που μπορεί να διασχίσει τη Διώρυγα του Σουέζ πλήρως φορτωμένο. Το μικρότερο μέγεθος των αποκλειστικών δεξαμενόπλοιων αργού πετρελαίου είναι ένα «Aframax» που μπορεί να μεταφέρει περίπου 600.000 βαρέλια πετρελαίου. Υπάρχουν μικρότερα δεξαμενόπλοια στην αγορά, αλλά αυτά τείνουν να μεταφέρουν προϊόντα διύλισης πετρελαίου και μαζούτ, όχι αργό πετρέλαιο. Η κατασκευή δεξαμενόπλοιων αργού πετρελαίου διαρκεί 9 έως 15 μήνες από την πρώτη τοποθέτηση της καρίνας. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειαστούν τουλάχιστον δύο χρόνια από την υπογραφή της σύμβασης νεότευκτου (παραγγελία) έως ότου παραδοθεί το σκάφος, επειδή πολλά κρίσιμα μέρη είναι είδη μακράς διάρκειας που πρέπει να παραγγελθούν και να παραχθούν πριν ξεκινήσει η ναυπήγηση του πλοίου. Το τεράστιο μέγεθός τους υπαγορεύει ότι υπάρχει περιορισμένος αριθμός τοποθεσιών ικανών να τις κατασκευάσουν και αυτές είναι συγκεντρωμένες στην Ασία, πιο συγκεκριμένα στη Νότια Κορέα, την Κίνα και την Ιαπωνία. Η τιμή για τη σύναψη σύμβασης για τη ναυπήγηση ενός νεότευκτου

δεξαμενόπλοιου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η τιμή της ενέργειας, ο χάλυβας, το κόστος εργασίας και η διαθέσιμη χρηματοδότηση κατασκευής. Η σχετική ζήτηση για τη σύναψη νέας χωρητικότητας παίζει επίσης ρόλο και μπορεί να επιμηκύνει ή να μειώσει τον χρόνο αναμονής μέχρι την παράδοση και να επηρεάσει την τιμή. Τα τελευταία δέκα χρόνια το κόστος ενός νέου VLCC κυμάνθηκε από περίπου 80 εκατομμύρια USD έως 160 εκατομμύρια USD. Το προφίλ πληρωμών στα πλοία τείνει να είναι πολύ εκ των υστέρων, συνήθως με κατάθεση 10% κατά την υπογραφή της σύμβασης, 20% έως 40% σε πληρωμές ορόσημο και, τέλος, 50% έως 70% κατά την παράδοση. Η οικονομική διάρκεια ζωής ενός πετρελαιοφόρου ήταν ιστορικά 25 χρόνια, αν και πιο πρόσφατα έχει πέσει πιο κοντά στα 20 χρόνια. Διαφορετικές εταιρείες δεξαμενόπλοιων λειτουργούν με τις δικές τους πολιτικές απόσβεσης περιουσιακών στοιχείων, που κυμαίνονται από 18 έως 25 έτη (Euronav, 2017).

Κεφάλαιο 3: Εναλλακτικά καύσιμα και τεχνολογίες για πράσινη ναυτιλία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία δέχεται αυξανόμενη πίεση να ενεργήσει σύμφωνα με τη Συμφωνία του Παρισιού και να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG). Οι ουσιαστικές μειώσεις των εκπομπών που πρέπει να επιτευχθούν τις επόμενες δεκαετίες αναμένεται να οδηγήσουν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και, ειδικότερα, στην εισαγωγή καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Επιπλέον, οι αρχές δίνουν όλο και μεγαλύτερη προσοχή στις συνέπειες των επικίνδυνων εκπομπών NO_x, SO_x και σωματιδίων σε τοπικό επίπεδο. Σε όλο τον κόσμο, η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί σοβαρά προβλήματα υγείας και πρόωρους θανάτους και η τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση θα υπόκειται σε αυστηρότερους κανονισμούς τα επόμενα χρόνια. Η μείωση των εκπομπών στον αέρα και η εισαγωγή νέων τεχνολογιών πρόωσης αποτελούν βασικές προκλήσεις για τον παγκόσμιο τομέα μεταφορών, συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλίας. Ο μελλοντικός στόλος του κόσμου θα πρέπει να βασίζεται σε ένα ευρύτερο φάσμα καυσίμων, λύσεων πρόωσης και μέτρων ενεργειακής απόδοσης. Όλες οι εναλλακτικές επιλογές καυσίμου έχουν πλεονεκτήματα και προκλήσεις (IMO, 2018). Μεταξύ των προτεινόμενων εναλλακτικών καυσίμων για τη ναυτιλία, το LNG, το LPG, η μεθανόλη, τα βιοκαύσιμα, η αμμωνία και το υδρογόνο έχουν προσδιοριστεί ως οι πιο υποσχόμενες λύσεις. Μεταξύ των νέων τεχνολογιών πρόωσης, θεωρείται ότι τα συστήματα μπαταριών, οι κυψέλες καυσίμου και η υποβοηθούμενη από τον αέρα πρόωση προσφέρουν δυνατότητες για εφαρμογές σε πλοία. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου για πλοία βρίσκονται υπό ανάπτυξη, αλλά θα χρειαστεί χρόνος για να επιτευχθεί ένα επίπεδο ωριμότητας επαρκές για την αντικατάσταση των κύριων κινητήρων. Τα συστήματα μπαταριών βρίσκουν το δρόμο τους στη ναυτιλία. Ωστόσο, στα περισσότερα ποντοπόρα πλοία ο ρόλος τους περιορίζεται στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και της ευελιξίας. Η υποβοηθούμενη από τον άνεμο πρόωση, αν και δεν είναι νέα τεχνολογία, θα απαιτήσει κάποιες εργασίες ανάπτυξης για να κάνει μια ουσιαστική διαφορά για τα σύγχρονα πλοία. Όταν πρόκειται για εκπομπές CO₂, το LNG είναι το ορυκτό καύσιμο που παράγει τις χαμηλότερες ποσότητες. Ωστόσο, η απελευθέρωση άκαυστου μεθανίου (η λεγόμενη διαρροή μεθανίου) θα μπορούσε να μειώσει το όφελος έναντι των HFO και MGO σε ορισμένους τύπους κινητήρων. Το μεθάνιο (CH₄) έχει 25 έως 30 φορές μεγαλύτερη συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από το CO₂. Ωστόσο, οι κατασκευαστές κινητήρων ισχυρίζονται ότι οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ των κινητήρων Otto διπλού καυσίμου (DF) είναι

χαμηλότερες από αυτές των κινητήρων με πετρέλαιο. Εάν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή βιομάζα, το αποτύπωμα άνθρακα της μεθανόλης και του υδρογόνου μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερα από αυτά των HFO και MGO (EMSA, 2019). Το καθαρότερο καύσιμο είναι το υδρογόνο που παράγεται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το υγροποιημένο υδρογόνο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μελλοντικές ναυτιλιακές εφαρμογές. Ωστόσο, λόγω της πολύ χαμηλής ογκομετρικής ενεργειακής του πυκνότητας απαιτεί μεγάλους όγκους αποθήκευσης, οι οποίοι ενδέχεται να εμποδίσουν τη χρήση του υδρογόνου απευθείας στη διεθνή ναυτιλία βαθέων υδάτων. Σε έναν κόσμο βιώσιμης ενέργειας όπου η συνολική ζήτηση ενέργειας καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές, το υδρογόνο και το CO₂ θα είναι τα βασικά συστατικά για την παραγωγή καυσίμων, πιθανότατα με τη μορφή συνθετικού μεθανίου ή υγρών καυσίμων μέσω των διεργασιών Sabatier/Fischer-Tropsch. Η διαδικασία Sabatier είναι μια αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα σε υψηλές θερμοκρασίες – βέλτιστα 300 έως 400°C – και πιέσεις παρουσία καταλύτη νικελίου για την παραγωγή μεθανίου και νερού. Μια εναλλακτική λύση, η διαδικασία Fischer-Tropsch μετατρέπει ένα μείγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου σε υγρούς υδρογονάνθρακες σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων. Μελλοντικά, το LNG έχει ήδη ξεπεράσει τα εμπόδια της διεθνούς νομοθεσίας και η μεθανόλη και τα βιοκαύσιμα θα ακολουθήσουν το παράδειγμά τους πολύ σύντομα. Θα περάσει λίγος χρόνος μέχρι το υγραέριο και το υδρογόνο να καλυφθούν από τους κατάλληλους νέους κανονισμούς εντός του Κώδικα IGF του IMO. Οι υφιστάμενοι και οι επικείμενοι περιβαλλοντικοί περιορισμοί μπορούν να αντιμετωπιστούν από όλα τα εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιούν την υπάρχουσα τεχνολογία. Ωστόσο, ο στόχος του IMO για μείωση των εκπομπών GHG κατά 50% έως το 2050 είναι φιλόδοξος και πιθανότατα θα απαιτήσει ευρεία απορρόφηση καυσίμων μηδενικών εκπομπών άνθρακα και περαιτέρω βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν όλα τα διαθέσιμα εναλλακτικά καύσιμα και να επιτύχουν αποδόσεις συγκρίσιμες ή καλύτερες από αυτές των σημερινών συστημάτων πρόωσης (DNV, 2018).

Ωστόσο, η τεχνολογία κυψελών καυσίμου για πλοία είναι ακόμη στα σπάργα. Τα πολλά υποσχόμενα και προηγμένα έργα είναι, για παράδειγμα, αυτά που εκτελούνται υπό την ομπρέλα του έργου του φάρου e4ships στη Γερμανία, με τις Meyer Werft και ThyssenKrupp Marine Systems να ηγούνται των έργων για τα πλοία. Η υποβοηθούμενη

από τον άνεμο πρόωση θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου, ειδικά όταν χρησιμοποιείται για αργά πλοία, αλλά η επιχειρηματική υπόθεση παραμένει δύσκολη. Οι μπαταρίες ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν ως εναλλακτική πηγή καυσίμου με την ευρύτερη έννοια. Ειδικά σε πλοία που εκτελούν σύντομα ταξίδια, έχουν μεγάλες δυνατότητες ως μέσο για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας του συστήματος πρόωσης. Στη ποντοπόρο ναυτιλία, οι μπαταρίες από μόνες τους δεν μπορούν να καλύψουν επαρκώς τις ανάγκες πρόωσης ενός πλοίου. Τέλος, καθώς τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και τα εναλλακτικά καύσιμα γίνονται ευρέως διαθέσιμα, η γνωστή τεχνολογία συνδυασμένου κύκλου αερίου και ατμοστρόβιλου όπως χρησιμοποιείται στο έργο PERFECt Ship αντιπροσωπεύει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για συστήματα πρόωσης πλοίων υψηλής ισχύος (DNV, 2018).

3.1. Μεθάνιο

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) (πάνω από 95% μεθάνιο) είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εναλλακτικά καύσιμα για πλοία καθώς συμμορφώνονται με τα τρέχοντα όρια SO_x και NO_x και για μείωση των εκπομπών CO₂ από τη λειτουργία του πλοίου. Τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου χρησιμοποιούν το εξατμισμένο τμήμα του αποθηκευμένου LNG για περισσότερα από 40 χρόνια για να μειώσουν το κόστος του καυσίμου σε ένα ταξίδι. Η χρήση LNG περιοριζόταν σε αυτές τις εξειδικευμένες εφαρμογές μέχρι την πρόσφατη υιοθέτηση αυστηρότερων ορίων εκπομπών κατά την τελευταία δεκαετία. Το LNG είναι ένα άχρωμο και μη τοξικό υγρό, που δημιουργείται από φυσικό αέριο που ψύχεται στους -162 °C. Συνήθως περιλαμβάνει περισσότερο από 95% μεθάνιο (CH₄) και λιγότερο από 5% μείγμα άλλων υδρογονανθράκων (συνήθως αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνια) και άζωτο (Kuczyński, et al., 2020). Το μεθάνιο μπορεί να ληφθεί τόσο από πηγές με βάση τα ορυκτά καύσιμα όσο και από βιομάζα μέσω της αναερόβιας χώνευσης προς παραγωγή βιοαερίου. Το LNG με βάση τα ορυκτά καύσιμα προέρχεται από την εξόρυξη φυσικού αερίου. Το ορυκτό φυσικό αέριο υποβάλλεται σε επεξεργασία για την απομάκρυνση βαρύτερων υδρογονανθράκων και άλλων ακαθαρσιών και στη συνέχεια ψύχεται σε κρυογονικές θερμοκρασίες προς LNG. Το βιομεθάνιο παράγεται κυρίως μέσω της αναερόβιας χώνευσης (ΑΕ) ή αεριοποίησης βιομάζας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες πρώτες ύλες και βιομάζας, αν και υπάρχει μια τάση ανάκτησης ενέργειας από

απόβλητα, για παράδειγμα, από γεωργικά απόβλητα, οργανικά απόβλητα, κοπριά και λυματολάσπη. Το βιομεθάνιο έχει παρόμοιες ιδιότητες με το ορυκτό φυσικό αέριο, επομένως μπορεί να υγροποιηθεί και να διανεμηθεί αξιοποιώντας τις υποδομές φυσικού αερίου. Ωστόσο, το βιοαέριο που παράγεται από αναερόβια χώνευση περιέχει μία σημαντική ποσότητα CO₂, που πρέπει να απομακρυνθεί μέσω συνήθως της διεργασίας της απορρόφησης για να επιτευχθεί καθαρότητα βιομεθανίου πάνω από 95% κατ' όγκο, πριν χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε πλοία. Το κόστος του καθαρισμού είναι σχετικά υψηλό λόγω της χρήσης ενέργειας και χημικών ουσιών στη διαδικασία, και αυτό είναι ένα από τα κύρια εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση του βιομεθανίου ως καυσίμου (Li, et al., 2017).

3.2. Βιοντίζελ

Το βιοντίζελ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως άμεσο υποκατάστατο του καυσίμου ντίζελ, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ή απόβλητα. Η Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών όρισε το βιοκαύσιμο ως μονοαλκυλεστέρες λιπαρών οξέων μακράς αλυσίδας που προέρχονται από βρώσιμα έλαια, μη βρώσιμα έλαια και χρησιμοποιημένα λάδια. Το βιοντίζελ εμφανίζεται σε υγρή κατάσταση σε θερμοκρασία δωματίου και με παρόμοια χημικά χαρακτηριστικά με τα συμβατικά καύσιμα ντίζελ. Ωστόσο, δεν περιέχει θείο και έχει περισσότερο ελεύθερο οξυγόνο από το συμβατικό ντίζελ. Η ύπαρξη περισσότερου ελεύθερου οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη καύση και λιγότερες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, σωματιδίων, καπνού και υδρογονανθράκων κατά την καύση. Επιπλέον, το υψηλότερο σημείο ανάφλεξης, η βιοαποδόμηση, η μη τοξικότητα και η εγγενής λιπαντικότητα είναι κάποια πλεονεκτήματα που αξίζει να αναφερθούν όταν χρησιμοποιείται το βιοντίζελ ως καύσιμο πλοίων. Το βιοντίζελ είναι συμβατό με την πλειονότητα των υφιστάμενων συστημάτων κινητήρων που βασίζονται σε ντίζελ, χωρίς να απαιτούνται τροποποιήσεις. Ως εκ τούτου, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του ντίζελ διαθέτοντας χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (Silitonga, et al., 2013).

Το βιοντίζελ μπορεί να παραχθεί από μια μεγάλη ποικιλία πρώτων υλών από φυτικά έλαια, απόβλητα μαγειρικά έλαια, λάσπη από εργοστάσια, ζωικά λίπη και άλλες ελαιώδεις πηγές. Το Συμβουλευτικό Συμβούλιο Επιστημών των Ευρωπαϊκών Ακαδημιών (EASAC) (2012) έχει ταξινομήσει τα βιοντίζελ σε τέσσερις γενιές σύμφωνα με την πρώτη ύλη παραγωγής. Το βιοντίζελ πρώτης γενιάς παράγεται από

βρώσιμες πρώτες ύλες (όπως σογιέλαιο, λάδι canola και κραμβέλαιο), μη βρώσιμα έλαια (για παράδειγμα Neem oil, Jatropha curcas, Nagchampa oil, Karanja oil, honge oil) αποτελούν τη δεύτερη γενιά και βιοντίζελ από χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια τρίτης γενιάς. Το βιοντίζελ τέταρτης γενιάς αποτελείται από έλαιο που προέρχεται από βιοχημικές μεθόδους και η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη. Οι κύριες πρώτες ύλες για την παραγωγή βιοντίζελ ποικίλλουν μεταξύ των περιοχών ανάλογα με τη διαθεσιμότητα. Για παράδειγμα, το βιοντίζελ στις ΗΠΑ παράγεται κυρίως από λάδι canola, κραμβέλαιο στην Ευρώπη και φοινικέλαιο στη Μαλαισία. Αυτά τα βιοκαύσιμα πρώτης και δεύτερης γενιάς συχνά ανταγωνίζονται τις γεωργικές εκτάσεις και, άμεσα και έμμεσα, επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα των οικοσυστημάτων. Επιπλέον, τα βιοντίζελ που λαμβάνονται από διαφορετικές πρώτες ύλες έχουν μεγάλες διακυμάνσεις στην καθαρότητα, τη σύσταση και τα χαρακτηριστικά (Correa, et al., 2019).

3.3 Μεθανόλη

Η μεθανόλη, ως εναλλακτικό καύσιμο, έχει λάβει αυξανόμενη προσοχή στη ναυτιλιακή βιομηχανία την τελευταία δεκαετία. Έχουν διεξαχθεί διάφορες μελέτες και επιδεικτικά έργα για να δοκιμαστεί η σκοπιμότητα χρήσης της μεθανόλης ως καυσίμου σε πλοία. Η μεθανόλη (MeOH) είναι η απλούστερη αλκοόλη, γνωστή και ως μεθυλική αλκοόλη ή ξυλόπνευμα. Είναι ένα τοξικό, ελαφρύ, πτητικό και εύφλεκτο υγρό σε τυπική θερμοκρασία και πίεση. Σε σύγκριση με τα καύσιμα ντίζελ πλοίων, η μεθανόλη έχει υψηλότερη αναλογία H/C, υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξυγόνο και υψηλότερο αριθμό οκτανίων (ON). Η υψηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο βοηθά στην επίτευξη πιο αποτελεσματικής καύσης στους κινητήρες (Zincir, et al., 2019). Ως καθαρότερο καύσιμο, η κατανάλωση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης παράγει σχεδόν μηδενικά SOx και μειωμένες εκπομπές CO₂ και PM σε σχέση με τα HFO και MGO. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθανόλης στην περιβαλλοντική απόδοση είναι το χαμηλότερο δυναμικό σχηματισμού NOx από τη χαμηλή θερμοκρασία καύσης. Τα πλοία θα μπορούσαν να συμμορφώνονται με αυστηρότερους κανονισμούς εκπομπών NOx όταν χρησιμοποιούν μεθανόλη ως καύσιμο. Δεδομένα δοκιμών του πρώτου πλοίου στον κόσμο με καύσιμο μεθανόλη, το Stena Germanica πρότεινε ότι η μετάβαση από HFO σε μεθανόλη θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές SOx κατά 99%, τις εκπομπές PM κατά 95%, NOx κατά 60% και CO₂ κατά 25% (Bioenergy., 2020).

Η μεθανόλη μπορεί να παραχθεί από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων πρώτων υλών που περιέχουν άνθρακα, βιομάζας και μη βιολογικής προέλευσης ανανεώσιμης ενέργειας. Επί του παρόντος, η περισσότερη μεθανόλη παγκοσμίως παράγεται από την καταλυτική μετατροπή του αερίου σύνθεσης (CO και H₂) από την αναμόρφωση του φυσικού αερίου ή από την αεριοποίηση του άνθρακα (Dalena, et al., 2018). Και οι δύο από αυτές τις δύο οδούς συνδέονται με εκπομπές άνθρακα. Για να θεωρηθεί η μεθανόλη ως ένα βιώσιμο εναλλακτικό καύσιμο, οι μέθοδοι παραγωγής του θα πρέπει να στραφούν προς καθαρότερες λύσεις, όπου υιοθετούνται πιο βιώσιμες πρώτες ύλες ή δεσμεύονται αποτελεσματικά οι εκπομπές GHG που παράγονται κατά τη διαδικασία παραγωγής. Μεγάλο μέρος της τρέχουσας έρευνας επικεντρώνεται στη χρήση γεωργικών αποβλήτων, δασικής βιομάζας και αστικών στερεών αποβλήτων (MSW) και CO₂ ως πρώτες ύλες για την παραγωγή μεθανόλης. Η Καναδική εταιρεία Enerkem κατασκεύασε ένα εργοστάσιο στο Ρότερνταμ ικανό να μετατρέπει 350.000 μετρικούς τόνους αστικών στερεών απορριμμάτων (ΑΣΑ) σε 270 εκατομμύρια λίτρα μεθανόλης ετησίως. Η Σουηδική εταιρεία Södra ξεκίνησε το πρώτο εργοστάσιο βιομεθανόλης μεγάλης κλίμακας στον κόσμο, χρησιμοποιώντας δασική βιομάζα. Το εργοστάσιο μπορεί να παράγει 5250 τόνους βιομεθανόλης ετησίως, εφάμιλλης ποιότητας με τη μεθανόλη που παράγεται από ορυκτά καύσιμα (Leonzio, et al., 2019).

3.4. Αμμωνία

Η αμμωνία (NH₃), μια χημική ένωση που δεν περιλαμβάνει άνθρακα στο χημικό της τύπο, έχει κερδίσει σημαντική προσοχή ως πιθανό εναλλακτικό καύσιμο για τις θαλάσσιες μεταφορές. Παρόμοια με το υδρογόνο, η αμμωνία μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές και ενδεχομένως να καταναλωθεί με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, καθιστώντας την μια πολλά υποσχόμενη καθαρή εναλλακτική πηγή ενέργειας και μέσο αποθήκευσης του υδρογόνου. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της αμμωνίας σε σύγκριση με το υδρογόνο είναι η ευκολότερη αποθήκευση και μεταφορά (Zamfirescu & Dincer, 2008). Οι απαιτήσεις αποθήκευσης της αμμωνίας είναι παρόμοιες με το προπάνιο, σε τυπική θερμοκρασία (25 °C), η αμμωνία απαιτείται να συμπιέζεται σε πίεση 8,6 bar για να διατηρείται σε υγρή μορφή. Η ενεργειακή πυκνότητα της αμμωνίας σε τυπική κατάσταση αποθήκευσης είναι περίπου 22,5 MJ/kg, με περιεκτικότητα σε υδρογόνο 17,8% κατά βάρος. Επιπλέον, το καύσιμο αμμωνίας έχει ένα στενό εύρος αναφλεξιμότητας. Το όριο ευφλεκτότητας της αμμωνίας είναι μεταξύ 0,63 και 1,40,

επομένως θεωρείται γενικά μη εύφλεκτη στη διαδικασία μεταφοράς. Επιπλέον, η αμμωνία έχει πολύ έντονη οσμή και η διαρροή αμμωνίας στο πλοίο είναι εύκολο να ανιχνευθεί σε ίχνη (~5 ppm) (Zamfirescu & Dincer, 2009).

Η αμμωνία παράγεται σήμερα με τη διαδικασία Haber Bosch, η οποία χρησιμοποιεί έναν καταλύτη με βάση τον σίδηρο σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις (450 °C, 200 bar) για να συνδυάσει ατμοσφαιρικό άζωτο (N₂) και υδρογόνο για να σχηματίσει αμμωνία. Γενικά, η κύρια οδός στην παραγωγή του υδρογόνου για την σύνθεση της αμμωνίας είναι η ατμοαναμόρφωση του φυσικού αερίου (SMR) και έπεται η αεριοποίηση στερεών ανθρακούχων καυσίμων. Με το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μείωση των εκπομπών, βρίσκονται υπό διερεύνηση εναλλακτικές οδοί βιώσιμης παραγωγής αμμωνίας, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτροχημικών και βιολογικών μεθόδων. Οι ηλεκτροχημικές και βιολογικές διεργασίες μπορούν να διεξαχθούν σε χαμηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες σε σχέση με τη διαδικασία Haber Bosch. Η υιοθέτηση εναλλακτικών οδών θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει την τον ενεργοβόρο χαρακτήρα της παραγωγής αμμωνίας και να μειώσει το κόστος λειτουργίας. Οι εκπομπές άνθρακα από την παραγωγή αμμωνίας μπορούν να μειωθούν περαιτέρω χρησιμοποιώντας υδρογόνο που παράγεται από ηλεκτρόλυση του νερού με βάση ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντί για αναμόρφωση και αεριοποίηση με βάση τα ορυκτά καύσιμα (Zhang, et al., 2020).

Η μαύρη (συμβατική) αμμωνία παράγεται με τη χρήση φυσικού αερίου στη βιομηχανία νιτρικών λιπασμάτων. Η μελλοντική χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου στις θαλάσσιες μεταφορές προϋποθέτει σημαντική αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής αμμωνίας, καθώς η χρήση της στη ναυτιλία θα ανταγωνιστεί τη βιομηχανία λιπασμάτων που χρησιμοποιεί αμμωνία στη γεωργία και πιθανώς και σε άλλους τομείς. Η μπλε αμμωνία παράγεται συνδυάζοντας το φυσικό αέριο με την τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS), ελαχιστοποιώντας τις εκπομπές άνθρακα κατά τα δύο τρίτα. Είναι πιο ελκυστική, σε σύγκριση με τη συμβατική αμμωνία, λόγω της επαναχρησιμοποίησης ενός σημαντικού μέρους του αρχικά απελευθερωμένου CO₂ στην ατμόσφαιρα. Η πράσινη αμμωνία είναι αμμωνία μηδενικών εκπομπών άνθρακα, που παράγεται με αειφόρο ηλεκτρική ενέργεια, νερό και αέρα (Cardoso, et al., 2021).

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου για πλοία είναι ακόμη στα σπάργα. Η πρόβλεψη της μελλοντικής ανάπτυξης των κυψελών καυσίμου είναι πρόκληση, καθώς η

τεχνολογία δεν είναι επί του παρόντος ώριμη. Εκτός από την ωρίμανση της τεχνολογίας, απαιτείται σημαντική μείωση του κόστους για να καταστούν εμπορικά βιώσιμες οι κυψέλες καυσίμου. Οι απαιτήσεις για εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμου που βρίσκονται επί του παρόντος υπό ανάπτυξη στον IMO ενδέχεται να ενσωματωθούν στον Κώδικα IGF το 2028 το νωρίτερο. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως στις κυψέλες καυσίμου εξαλείφουν τις εκπομπές NO_x, SO_x και PM. Λόγω της υψηλής απόδοσης των κυψελών καυσίμου, είναι δυνατή η μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 30% όταν χρησιμοποιούνται καύσιμα με βάση τους υδρογονάνθρακες, όπως φυσικό αέριο ή μεθάνολη. Η χρήση κυψελών καυσίμου ελαχιστοποιεί επίσης τις εκπομπές κραδασμών και θορύβου, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Το υδρογόνο που χρησιμοποιείται στις κυψέλες καυσίμου δεν παράγει εκπομπές CO₂ και θα μπορούσε επίσης να εξαλείψει τις εκπομπές NO_x, SO_x και PM από τα πλοία (Lee & Song, 2018).

Ένα μειονέκτημα στη χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου πλοίων είναι η τοξικότητά της. Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας στον αέρα μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα υγείας όπως τύφλωση, βλάβη στους πνεύμονες, εγκεφαλική βλάβη και δυνητικά θάνατο. Ως εκ τούτου, η διαρροή αμμωνίας μπορεί γρήγορα να γίνει σοβαρή απειλή για τους χώρους καταλυμάτων και το προσωπικό του πλοίου (Cardoso, et al., 2021). Ωστόσο, τα προβλήματα τοξικότητας έχουν ήδη αντιμετωπιστεί σε μεγάλο βαθμό στη χρήση της αμμωνίας σε διάφορους τομείς, ιδίως στη γεωργία, τα χημικά και την ψύξη. Υφίστανται καθιερωμένα πρότυπα για τον χειρισμό, την αποθήκευση και τη χρήση της αμμωνίας σε διάφορες μορφές και φυσικά για την αντιμετώπιση της τοξικότητας της αμμωνίας. Επιπλέον, η ατελής καύση της αμμωνίας θα μπορούσε να οδηγήσει σε αύξηση των εκπομπών NO_x. Το θέμα αυτό σχετίζεται ιδιαίτερα με συστήματα κινητήρων εσωτερικής καύσης με άμεση χρήση αμμωνίας ως καύσιμο. Τα στενά όρια ευφλεκτότητας και η χαμηλή ταχύτητα φλόγας της αμμωνίας μπορούν να προκαλέσουν ατελή καύση στο σύστημα του κινητήρα. Το πρόβλημα της ατελούς καύσης μπορεί να μετριαστεί εάν η αμμωνία αποσυντεθεί πριν από την έγχυση στον κινητήρα. Το μείγμα υδρογόνου, αζώτου, αμμωνίας και αέρα έχει χαρακτηριστικά καύσης συγκρίσιμα με τη βενζίνη (Lee & Song, 2018).

Η διαθεσιμότητα σε επαρκείς ποσότητες και με βιώσιμο κόστος, η ανάπτυξη νέας υποδομής ανεφοδιασμού καυσίμων παγκοσμίως και κατάλληλων κινητήρων πλοίων, η έλλειψη προβλεψιμότητας του ρυθμιστικού πλαισίου και ζητήματα που σχετίζονται με

την έκθεση του πληρώματος σε τοξικούς ατμούς αμμωνίας κατά την αποθήκευση και το χειρισμό της αμμωνίας ως καυσίμου στο πλοίο πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η μέθοδος για την παραγωγή αμμωνίας με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη, ούτε για βιομηχανική χρήση ούτε για πλοία. Η πιθανή εφαρμογή σε κυψέλες καυσίμου αμμωνίας είναι ακόμη υπό ανάπτυξη. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας SOEC μπορεί να τονώσει τη χρήση της αμμωνίας στη ναυτιλία ως εναλλακτικού καυσίμου χωρίς άνθρακα. Οι κανονισμοί για την αμμωνία ως καύσιμο θα πρέπει να καλύπτονται από μελλοντική αναθεώρηση του Κώδικα IGF εντός του χρονικού πλαισίου του 2030. Το πιθανό υψηλό κόστος της πράσινης αμμωνίας είναι ένα σημαντικό στοιχείο. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και το κόστος και ο χώρος αποθήκευσης του καυσίμου.

3.5. Το Υδρογόνο ως ναυτιλιακό καύσιμο

Το θεμελιώδες πλεονέκτημα του υδρογόνου είναι ότι μπορεί να αποτελέσει ένα καύσιμο με μηδενικές εκπομπές ρύπων όταν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η χαμηλή πυκνότητά του το βοηθά να διαχέεται σχετικά γρήγορα στην ατμόσφαιρα όταν απελευθερώνεται σε ανοιχτό περιβάλλον. Το υδρογόνο στην ατμόσφαιρα δεν μπορεί να περιοριστεί από τη βαρύτητα της γης και τελικά διαφεύγει στην ατμόσφαιρα. Οι διαρροές υδρογόνου θεωρούνται μη τοξικές, αν και το ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας και η πιθανότητα καύσης μπορεί να εγείρει ανησυχίες για την ασφάλεια του υδρογόνου και τη διαχείριση των σχετικών κινδύνων. Το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να είναι ναυτιλιακό καύσιμο μηδενικού άνθρακα όταν καταναλώνεται σε κυψέλη καυσίμου ή σε κινητήρα εσωτερικής καύσης (Dalena, et al., 2018). Όταν καταναλώνεται σε κινητήρα καύσης διπλού καυσίμου, το υδρογόνο μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα. Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από το ότι έχει πολύ χαμηλές εκπομπές. Ωστόσο, ο κύκλος ζωής της παραγωγής υδρογόνου πρέπει να ληφθεί υπόψη για την αξιολόγηση των συνολικών εκπομπών GHG από το υδρογόνο. Όταν χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή υδρογόνου, οι εκπομπές άνθρακα και GHG ενδέχεται να μην μειώνονται απαραίτητα. Οι εκπομπές Well-to-Tank (WTT) λαμβάνουν υπόψη όλους τους ρύπους που παράγονται κατά την παραγωγή, αποθήκευση και μεταφορά του καυσίμου στον τελικό χρήστη. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν τις εκπομπές που παράγονται όταν ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο μετατρέπονται μέσω της αεριοποίησης ή της αναμόρφωσης προς υδρογόνο ή όταν

χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα για την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση του νερού. Για την πλήρη εξάλειψη των εκπομπών άνθρακα, είναι σημαντικό να εστιαστεί κάποιος σε μεθόδους παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς που έχουν χαμηλό έως και μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με ανανεώσιμους ή «πράσινους» τρόπους που μπορούν να εξαλείψουν τις εκπομπές άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου και να οδηγήσουν σε πολύ χαμηλές εκπομπές WTT. Όταν οι εκπομπές WTT και TTW (Tank-to-Wheel) εξαλειφθούν από τον κύκλο ζωής του καυσίμου, δημιουργείται μια επιλογή καυσίμου μηδενικού άνθρακα (WTW). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα πιστοποίησης της βιωσιμότητας του χρησιμοποιούμενου υδρογόνου ή πιστοποιητικά εγγυήσεων προέλευσης (GO), όπως στο Ευρωπαϊκό έργο CertifHy, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν στην αγορά υδρογόνου για την παρακολούθηση και τον ποσοτικό προσδιορισμό του αποτυπώματος εκπομπών του παραγόμενου/χρησιμοποιούμενου υδρογόνου. Τέτοια προγράμματα μπορούν να εφαρμοστούν σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο, αλλά δεν έχουν ακόμη υιοθετηθεί από τον IMO. Οι εκπομπές από την παραγωγή υδρογόνου συνθέτουν την πλειοψηφία των ρύπων WTW. Υπάρχουν τέσσερις τύποι υδρογόνου όσον αφορά τις εκπομπές που απελευθερώνονται κατά την παραγωγή: Καφέ υδρογόνο, που παράγεται από την επεξεργασία ορυκτού άνθρακα. Γκρι υδρογόνο, που παράγεται από την επεξεργασία άλλων ορυκτών καυσίμων ή φυσικού αερίου. Μπλε υδρογόνο, που παράγεται από την επεξεργασία ορυκτών καυσίμων που συνοδεύονται από τεχνολογίες δέσμευσης, χρήσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS). Πράσινο υδρογόνο, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνήθως μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού. Οι πηγές ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να περιλαμβάνουν ηλιακή ή αιολική ενέργεια για την παραγωγή μηδενικού άνθρακα καθαρού υδρογόνου. Το γκρίζο υδρογόνο που παράγεται από φυσικό αέριο είναι η κύρια μέθοδος παραγωγής υδρογόνου, που αντιπροσωπεύει το 75 % της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Το καφέ υδρογόνο είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή παραγωγής υδρογόνου, κυρίως στην Κίνα. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου συμβάλλει μόνο στο 2% της παγκόσμιας προσφοράς υδρογόνου, ενώ η παραγωγή μπλε υδρογόνου δεν είναι ακόμη ευρέως διαδεδομένη. Η παραγωγή του υδρογόνου από το φυσικό αέριο πραγματοποιείται μέσω αναμόρφωσης χρησιμοποιώντας τρεις καθιερωμένες μεθόδους: (i) αναμόρφωση με ατμό, η οποία χρησιμοποιεί το νερό ως οξειδωτικό μέσο (ii) μερική οξείδωση, η οποία χρησιμοποιεί είτε αέρα ή καθαρό οξυγόνο και (iii) αυτόθερμη αναμόρφωση, η οποία είναι ένας συνδυασμός των δύο

πρώτων μεθόδων αναμόρφωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, σχηματίζεται αέριο σύνθεσης (μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε υδρογόνο και CO₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου. Για τη μείωση των ανθρακικών εκπομπών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί βιομάζα για την παραγωγή αερίου σύνθεσης μέσω αεριοποίησης. Οι πυρηνικοί σταθμοί μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου από την αναμόρφωση με ατμό του μεθανίου ή τη θερμοχημική παραγωγή υψηλής θερμοκρασίας, αντικαθιστώντας τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).

Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από το ότι έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μάζα (120,2 MJ/kg), σε σύγκριση με άλλα καύσιμα για πλοία. Όσον αφορά την βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας, υπερβαίνει το MGO κατά 2,8 φορές και τις αλκοόλες κατά πέντε έως έξι φορές. Επομένως, το καύσιμο υδρογόνου μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματική απόδοση ενός κινητήρα και να συμβάλει στη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Ωστόσο, σε ογκομετρική βάση, λόγω της χαμηλότερης ογκομετρικής ενεργειακής του πυκνότητας, το υγρό υδρογόνο μπορεί να απαιτεί τέσσερις φορές περισσότερο χώρο από το MGO ή περίπου δύο φορές περισσότερο χώρο από το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) για ισοδύναμη ποσότητα ενέργειας. Επίσης είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση της ενέργειας του καυσίμου και των απαιτούμενων όγκων, η ενεργειακή απόδοση στη διάταξη μετατροπής ενέργειας που χρησιμοποιεί ο τελικός χρήστης. Για όλα τα καύσιμα πλοίων, ενδέχεται να απαιτούνται πρόσθετοι όγκοι καυσίμου για να ληφθούν υπόψη οι απώλειες απόδοσης μεταξύ της δεξαμενής και της παροχής ισχύος. Το υδρογόνο απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες κάτω από -253° C (-423,4° F) για να υγροποιηθεί. Λόγω αυτής της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας, ο απαιτούμενος όγκος για την αποθήκευση υγρού υδρογόνου θα μπορούσε να είναι ακόμη μεγαλύτερος όταν εξετάζονται τα απαραίτητα στρώματα υλικών ή μόνωση υπό κενό για την κρυογονική αποθήκευση του. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε άλλα υλικά, όπως σε υδρίδια μετάλλων (Raucci, 2017). Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης δεσμεύει υδρογόνο στις ενδόθετες θέσεις μετάλλων εφαρμόζοντας μέτρια πίεση και θερμότητα. Στη συνέχεια, το υδρογόνο εξάγεται μειώνοντας την πίεση και τη θερμότητα. Αν και είναι τεχνολογικά εφικτό και ασφαλές, τα μεταλλικά υδρίδια όπως και άλλες μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου σε στερεά υλικά μπορεί να μην είναι μια αποτελεσματική

λύση για την αποθήκευση υδρογόνου στα πλοία. Λόγω των προκλήσεων που σχετίζονται με την αποθήκευση σε χαμηλή θερμοκρασία ή υψηλή πίεση, το υδρογόνο μπορεί εναλλακτικά να μεταφερθεί υπό τη μορφή αμμωνίας ή μεθανόλης. Αυτά τα καύσιμα ενδέχεται να απαιτούν λιγότερη ενέργεια από αυτή που απαιτείται για την ψύξη του υγροποιημένου υδρογόνου ή για τη συμπίεση του αερίου υδρογόνου (GmbH, 2018). Ορισμένες κυψέλες καυσίμου μπορούν να καταναλώσουν αμμωνία, μεθανόλη ή άλλα καύσιμα φορείς υδρογόνου αναμορφώνοντας και εξάγοντας το υδρογόνο από το καύσιμο χρησιμοποιώντας αντιδραστήρες αναμόρφωσης ή διάσπασης. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες ενδέχεται να απαιτούν υψηλότερη εισροή ενέργειας για την υδρογόνωση και τη απομάκρυνση του υδρογόνου. Η αμμωνία ως ενεργειακός φορέας και ως φορέας υδρογόνου μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον κύκλο ζωής του καυσίμου υδρογόνου (R. Halim, et al., 2018).

Αν και το υδρογόνο δεν έχει ακόμη υιοθετηθεί ευρέως ως καύσιμο στη ναυτιλιακή βιομηχανία, έχει ήδη εφαρμοστεί σε χερσαίες χρήσεις. Δεν υπάρχουν διεθνείς θαλάσσιες απαιτήσεις που επιβάλλονται από τον IMO. Ωστόσο, ορισμένες από τις πληροφορίες, τους κανόνες και τους κανονισμούς αναφέρονται στο MSC.420(97). Αυτά περιλαμβάνουν μέτρα ασφαλείας, μεθόδους μεταφοράς και τυπικές διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου. Υπάρχουν διάφοροι αναφερόμενοι κώδικες και κανονισμοί για πρότυπα εξαρτημάτων υδρογόνου και σχεδιασμό εξοπλισμού, κώδικες πυρκαγιάς και άλλους ειδικούς για το υδρογόνο κώδικες ασφαλείας και γενικούς κώδικες ασφάλειας ή πρότυπα που περιλαμβάνουν το υδρογόνο. Η Τεχνική Έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) ISO/TR 15916 Βασικές Θεωρήσεις για την Ασφάλεια Συστημάτων Υδρογόνου εστιάζει στην παροχή τεχνικών πληροφοριών που αποτελούν τη βάση για την κατανόηση θεμάτων ασφάλειας του υδρογόνου. Η έκθεση αναφέρεται στο πρόσφατο ενδιαφέρον για τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου και στοχεύει να αντιμετωπίσει τις μοναδικές ιδιότητες και φαινόμενα ασφάλειας που σχετίζονται με το υδρογόνο και τις βέλτιστες πρακτικές μηχανικής για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων από το υδρογόνο. Λόγω της σχετικά νέας εφαρμογής του υδρογόνου ως καυσίμου στα πλοία, πολλοί κανονισμοί και συστήματα πιστοποίησης απαιτούν αξιολογήσεις κινδύνου για να επαληθευτεί ότι το σύστημα είναι επαρκώς ασφαλές και μπορεί να επιδεικνύει τουλάχιστον ισοδύναμο επίπεδο ασφάλειας με τα συμβατικά συστήματα καυσίμων και τις εφαρμογές αερίων καυσίμων (IRENA, 2020).

3.6. Βιοκαύσιμα, φυσικό αέριο και υδρογόνο στην πρόωση πλοίων

Η χρήση βιοκαυσίμων, υδρογόνου και φυσικού αερίου ως καύσιμα πρόωσης πλοίων έχει προταθεί ως εναλλακτική λύση για τον μετριασμό των εκπομπών άνθρακα στις θαλάσσιες μεταφορές. Ωστόσο, τα βιοκαύσιμα από φυτά ανταγωνίζονται άμεσα τις γεωργικές καλλιέργειες, προκαλώντας μακροπρόθεσμα δυνητικά περισσότερες δυσκολίες από όσες επιλύουν. Η αιθανόλη από κυταρρινούχα βιομάζα έχει επίσης δυσκολίες που σχετίζονται με την εφοδιαστική αλυσίδα της βιομάζας. Τα βιοκαύσιμα με βάση τα φύκια θα μπορούσαν να αναπτυχθούν τα επόμενα δέκα χρόνια, αλλά πρέπει πρώτα να ξεπεράσουν αρκετές άλυτες προκλήσεις που καθιστούν αβέβαιη την υιοθέτησή τους ως ευρέως διαθέσιμο καύσιμο (Tanaka & Okada, 2019). Η Ευρωπαϊκή Τεχνολογική Πλατφόρμα Βιοκαυσίμων ορίζει τα βιοκαύσιμα πρώτης, δεύτερης και τρίτης γενιάς ως εξής:

Πρώτη Γενιά: Η ζάχαρη, το λίπος ή το άμυλο που προέρχονται απευθείας από ένα φυτό χρησιμοποιούνται ως πηγή άνθρακα του βιοκαυσίμου. Η καλλιέργεια θεωρείται ότι συγκρούεται με την παραγωγή τροφίμων, είτε άμεσα είτε έμμεσα.

Δεύτερη γενιά: Ο άνθρακας για βιοκαύσιμα προέρχεται από κυταρίνη, ημικυταρίνη, λιγνίνη ή πηκτίνη. Παραδείγματα περιλαμβάνουν γεωργικά, δασοκομικά υπολείμματα ή μη-τροφικές πρώτες ύλες που καλλιεργούνται για το σκοπό αυτό..

Τρίτη Γενιά: Οι υδρόβιοι αυτότροφοι οργανισμοί παρέχουν τον άνθρακα για βιοκαύσιμα (π.χ. φύκια). Η πρώτη ύλη προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία, το διοξείδιο του άνθρακα και θρεπτικά συστατικά.

Στις μεταφορές, τα βιοκαύσιμα αποτελούν την καταλληλότερη λύση για την υποκατάσταση της βενζίνης ή του ντίζελ. Ωστόσο, στη ναυτιλία, η χρήση και η εμπειρία είναι περιορισμένες. Η πρόκληση με τα βιοκαύσιμα στον ναυτιλιακό τομέα είναι η έλλειψη εμπειρίας και κατανόησης στον χειρισμό και την εφαρμογή των βιοκαυσίμων. Μια άλλη πρόκληση είναι η τεράστια ποσότητα βιομάζας που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών σε καύσιμα στον τομέα της ναυτιλίας. Κατά συνέπεια, η βιώσιμη παραγωγή βιοκαυσίμων περιορίζεται από το κόστος των τροφίμων, τη διαθεσιμότητα της γης και τις κοινωνικές εκτιμήσεις (Mihail–Vlad, 2019). Επιπλέον, υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την αποθήκευση των βιοκαυσίμων και τη σταθερότητα τους, επομένως απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση και έρευνα. Ωστόσο, ένας συνδυασμός νομοθεσίας, κανονισμών, ενθάρρυνσης και τεχνολογικών και ριζικών

αναβαθμίσεων θα μπορούσε να βοηθήσει τη ναυτιλιακή βιομηχανία να οικοδομήσει μια σημαντική αγορά για τα βιοκαύσιμα. Η πρόωση υδρογόνου στα πλοία είναι τεχνικά εφικτή, αλλά απαιτεί μεγάλης κλίμακας υλοποίηση υποδομών υδρογόνου για την παραγωγή, την αποθήκευση και τις λιμενικές υπηρεσίες, η οποία προς το παρόν δεν έχει ακόμη καθοριστεί. Επιπλέον, καθώς το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή θερμοκρασία φλόγας, η καύση μιγμάτων υδρογόνου-αέρα κοντά στη στοιχειομετρική σύσταση μπορεί να οδηγήσει σε χαοτικές πρακτικές προανάφλεξης και υψηλές θερμοκρασίες καύσης, με αποτέλεσμα σημαντικές εκπομπές NOx. Επιπλέον, το υδρογόνο ενδείκνυται περισσότερο ως καύσιμο για έναν κινητήρα ανάφλεξης με σπινθήρα παρά για έναν κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση, κάτι που θα μπορούσε να είναι πρόβλημα για τη ναυτιλιακή αγορά. Για τους κινητήρες ανάφλεξης ντίζελ, το φυσικό αέριο θα μπορούσε να επιτύχει τους στόχους για το κλίμα σε 30 χρόνια, αλλά πρέπει να παράγεται με υπευθυνότητα σε μια μελλοντική 100% βιώσιμη οικονομία. Το φυσικό αέριο μπορεί να παραχθεί με βιώσιμο τρόπο από τη βιομάζα μέσω αεριοποίησης και μετατροπής του αερίου σύνθεσης σε συνθετικό φυσικό αέριο μέσω της διεργασίας Sabatier ή από τον συνδυασμό πράσινου ηλεκτρολυτικού υδρογόνου με δεσμευμένες βιομηχανικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η πρώτη μέθοδος θα μπορούσε να συμβάλει στην παραγωγή μεθανίου για την αναμόρφωσή του προς σύνθεση αμμωνίας. Η δεύτερη μέθοδος αποτελεί μία μακροπρόθεσμη λύση. Εάν η θερμότητα που παράγεται στην αντίδραση και το CO₂ που εκπέμπεται από βιομηχανικές διεργασίες επαναχρησιμοποιηθούν, μπορεί να επιτύχει απόδοση 55-56% (Tanaka & Okada, 2019).

3.7. Ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε μπαταρίες

Όλα τα ηλεκτρικά και υβριδικά πλοία με αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλες μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να προσφέρουν σημαντικές μειώσεις στο κόστος καυσίμου, τη συντήρηση και τις εκπομπές, καθώς και βελτιωμένη απόκριση, κανονικότητα και ασφάλεια. Μέχρι σήμερα, οι μεγάλες μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε μικρές διαδρομές, κυρίως ως βοηθητική πηγή ενέργειας σε συνδυασμό με παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, με πλεονεκτήματα εξισορρόπησης φορτίου, σε «υβριδική» διαμόρφωση, δηλαδή μπαταρίες σε συνδυασμό με συμβατικές γεννήτριες. Στην Αμερική, οι χειριστές OSV που εγκαθιστούν μπαταρίες περιελάμβαναν τις Seacor, Companhia Brasileira de Offshore και, πιο πρόσφατα, Harvey Gulf Marine, που τοποθετούν μπαταρίες σε πλοία «τριών καυσίμων» με καύσιμο με συμβατικό ντίζελ

και LNG. Η τρέχουσα έκρηξη στον τομέα της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας έχει δώσει μια περαιτέρω ώθηση στις μπαταρίες για χρήση σε πλοία. Η Louis Dreyfus Armateurs, με δύο πλοία Service Operations, έχει αναπτύξει το Onboard DC Grid της ABB. Η ABB εξηγεί ότι αυτό το Σύστημα Ηλεκτρικής Παροχής (ESS) θα ενσωματώσει δύο σετ μπαταριών (Parker, 2021). Για την κάλυψη των φορτίων αιχμής μπορούν να χρησιμοποιηθούν μπαταρίες αντί για την εκκίνηση ενός επιπλέον κινητήρα. Και πάλι, η ισχύς της μπαταρίας μπορεί να λειτουργήσει ως εφεδρική για τις γεννήτριες που λειτουργούν, μειώνοντας την ανάγκη λειτουργίας της πλεονάζουσας χωρητικότητας της γεννήτριας. Οι μπαταρίες φέρνουν αποδοτικότητα εκεί όπου τα πλοία πρέπει να περιμένουν δίπλα σε στρόβιλους, καθώς η ισχύς της μπαταρίας μπορεί να υποκαταστήσει τις μη αποδοτικές γεννήτριες χαμηλών στροφών (Cowan, 2015).

Τα πράσινα διαπιστευτήρια έχουν επίσης επηρεάσει τις επιλογές ισχύος στον τομέα των πλοίων, με τις περιβαλλοντικές στάσεις των εταιρειών να αποτελούν πλέον παράγοντα στις επιλογές των επιβατών. Σε μια υβριδική κατάσταση, μία ή περισσότερες γεννήτριες που κινούνται με ντίζελ αντικαθίστανται από μπαταρίες, οι οποίες στη συνέχεια θα λειτουργούν για εξισορρόπηση φορτίου. Για πλοία που λειτουργούν με σταθερή ισχύ σε μεγάλα ταξίδια, η υβριδική πρόωση έχει νόημα μόνο εάν υπάρχουν διαφορετικά φορτία. Οι υψηλές ταχύτητες ή οι μεγάλες αποστάσεις κάνουν τη χρήση ενός ESS λιγότερο ελκυστική λόγω του τεράστιου μεγέθους της εγκατάστασης της μπαταρίας.

Οι εκσυγχρονισμοί μπαταριών ξεκίνησαν κατά τη διάρκεια του 2013 - 2016, με τη Scandlines (με δρομολόγια μεταξύ Δανίας και Γερμανίας στη Βαλτική Θάλασσα ECA) να εξοπλίζει με μπαταρίες ιόντων λιθίου έξι επιβατηγά πλοία, εκ των οποίων δύο με 1.300 επιβάτες/460 οχήματα. Στη Βόρεια Αμερική, η Washington State Ferries (WSF) έχει ξεκινήσει ένα σχέδιο για να ηλεκτροδοτήσει σχεδόν όλο το στόλο της, σύμφωνα με το Σχέδιο Μεγάλης Απόστασης 2040 (LRP). Η WSF ανακοίνωσε σχέδια για τη μετατροπή των τριών μεγαλύτερων πλοίων της, της κατηγορίας Jumbo Mark II, από ντίζελ σε υβριδικό-ηλεκτρικό 10,4 MWH, με αναβαθμίσεις συστήματος που θα παρέχονται από τη Siemens (η οποία είχε βοηθήσει τη Scandlines νωρίτερα) (Parker, 2021).

Κεφάλαιο 4: Βιωσιμότητα και οικονομικές προοπτικές της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στον τομέα της ναυτιλίας

4.1. Κυβερνητικές πολιτικές στον τομέα της ναυτιλίας

Σε διάφορα επίπεδα διακυβέρνησης, έχουν σημειωθεί πρόοδοι σχετικά με τον έλεγχο των εκπομπών από τον τομέα της ναυτιλίας. Οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων μαύρου άνθρακα (BC) από την χρήση ντίζελ αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα των εκπομπών στις μεταφορές. Αυτό είναι ένα ζήτημα τόσο στην αεροπλοΐα όσο και στις θαλάσσιες μεταφορές. Τοπικά, το Λος Άντζελες, το Λονγκ Μπιτς, το Όκλαντ και το Βανκούβερ στις ακτές του Ειρηνικού της Βόρειας Αμερικής έχουν θεσπίσει μέτρα για τη μείωση των εκπομπών. Για παράδειγμα το Λος Άντζελες και το Λονγκ Μπιτς μείωσαν τις εκπομπές σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένου του μαύρου άνθρακα, κατά 81% μεταξύ 2005 και 2013. Το σχέδιό τους έχει μια σημαντική διάκριση μεταξύ της χρήσης θετικών κινήτρων που συνίστανται σε αποζημίωση σε μετρητά για κάθε σκάφος που εισέρχεται στα λιμάνια που συμμορφώνεται με εθελοντικά πρότυπα εκπομπών και χρήση αρνητικών κυρώσεων για μη συμμόρφωση με τους απαιτούμενους περιορισμούς. Ωστόσο, είναι πιο περίπλοκο σε εθνικό επίπεδο και επίπεδο ΕΕ. Προκειμένου να προειδοποιήσει τον IMO η ΕΕ ότι θα ξεκινήσει να συμπεριλαμβάνει τη ναυτιλία στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών το 2023, εκτός εάν ο IMO συμφωνήσει σε ένα παγκόσμιο σύστημα που θα περιόριζε τις εκπομπές άνθρακα από τον τομέα της ναυτιλίας, υπάρχει υποστήριξη τόσο από την Επιτροπή όσο και από το Κοινοβούλιο. Σε κάθε περίπτωση, νέοι κανονισμοί της ΕΕ τέθηκαν σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2018, απαιτώντας από τα λιμάνια να συλλέγουν πληροφορίες για τις εκπομπές καυσαερίων. Αυτός είναι μόνο ο πρώτος από τους πολλούς περιορισμούς που θα εφαρμοστούν τα επόμενα χρόνια (Brewer, 2019). Στην Ασία και ειδικότερα στη Κίνα και στην Ινδία έχουν αναπτυχθεί πολιτικές πρωτοβουλίες με φιλόδοξους στόχους για τον έλεγχο της ρύπανσης στις θαλάσσιες μεταφορές. Η Ινδία σκοπεύει να κατασκευάσει 10 ολοκαίνουργια μεγάλα λιμάνια, να εκσυγχρονίσει δώδεκα ήδη υπάρχοντα κρατικά λιμάνια και να κατασκευάσει ολοκαίνουργια ιδιωτικά λιμάνια. Όσον αφορά την Κίνα, οι Κινέζοι επενδυτές κατέχουν ή έχουν μερίδιο σε σχεδόν τα δύο τρίτα των 50 μεγαλύτερων λιμένων εμπορευματοκιβωτίων σε όλο τον κόσμο. Έξι λιμάνια στην Κίνα και άλλα 15 περίπου λιμάνια, κυρίως επτά στην Αφρική και τέσσερα στην Ευρώπη, αποτελούν μέρος της στρατηγικής της για το Maritime Silk Road (MSR) (Brewer, 2019). Έως και 73 έθνη έχουν εκφράσει ενδιαφέρον να ενταχθούν στο MSR. Δεδομένης της ποσότητας και του εύρους αυτών των εξελίξεων στην Κίνα και την

Ινδία, οι κανονισμοί ελέγχου των εκπομπών στις εγκαταστάσεις τους θα έχουν φυσικά αντίκτυπο στα τοπικά, περιφερειακά, ακόμη και σε παγκόσμια επίπεδα εκπομπών. Οι Εθνικές Κινεζικές Ζώνες Ελέγχου Εκπομπών (ECZ) αναπτύσσονται στην Κίνα και έχουν δημιουργηθεί διεθνείς περιφερειακές περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA) στις πλωτές οδούς της Βόρειας Αμερικής και της Βόρειας Ευρώπης.

Επιπλέον, υφίστανται πολλές ιδιωτικές προσπάθειες για περαιτέρω ρύθμιση και έλεγχο των εκπομπών από τις θαλάσσιες μεταφορές. Αυτά περιλαμβάνουν την Πρωτοβουλία για το κλίμα της Διεθνούς Ένωσης Λιμένων, την Πρωτοβουλία για την Αειφόρο Ναυτιλία και τον Δείκτη Καθαρής Ναυτιλίας (IHPH). Εκτός από τις σωματιδιακές εκπομπές των ντιζελοκίνητων αυτοκινήτων, τραίνων και των μηχανημάτων σε λιμάνια υπάρχει έντονη ανησυχία και για τις σωματιδιακές εκπομπές αιθάλης από τα πλοία (Brewer, 2019).

4.2. Περιβαλλοντική Απόδοση Εναλλακτικών Καυσίμων Ναυτιλίας

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών καυσίμων λαμβάνοντας υπόψη εάν μπορούν πραγματικά να υποστηρίξουν τις μειώσεις των εκπομπών και τις συναφείς επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από τις ναυτιλιακές δραστηριότητες, πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τις άμεσες εκπομπές που παράγονται στο πλοίο, αλλά και τις εκπομπές από ολόκληρη την αλυσίδα παραγωγής, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής του καυσίμου στους τελικούς χρήστες. Τα εναλλακτικά καύσιμα που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία έχουν το κοινό χαρακτηριστικό, ότι όλα μπορούν να παραχθούν με διαφορετικές μεθόδους από μία ευρεία γκάμα πρώτων υλών και πρωτογενών ενεργειακών πηγών. Η αποτελεσματικότητα, η αποδοτικότητα και οι εκπομπές που παράγονται από την παραγωγή ενός καυσίμου ποικίλλουν ανάλογα με την τεχνολογία και την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται. Ως εκ τούτου, σε αυτή τη μελέτη, παρουσιάστηκε μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών οδών παραγωγής των καυσίμων σε όλη την ενεργειακή αλυσίδα αξίας τους. Μέσω της αξιολόγησης και σύγκρισης των εκπομπών στο συνολικό κύκλο ζωής τους, μπορούν να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και οι πιθανές ευκαιρίες από την χρήση των εναλλακτικών καυσίμων σε πλοία προς την κατεύθυνση της απανθρακοποίησης του τομέα της ναυτιλίας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι υφιστάμενοι κανονισμοί στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών εφαρμόζονται μόνο στις άμεσες εκπομπές που παράγονται από τις ναυτιλιακές

δραστηριότητες. Οι υπόλοιπες εκπομπές στην συνολική αλυσίδα παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς του καυσίμου συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη στα υφιστάμενα νομικά πλαίσια (Pereira & Posen, 2020).

4.2.1. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) αναφέρεται στην ικανότητα ενός αερίου ρύπου να συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην υπερθέρμανση του πλανήτη σε σχέση με ένα αέριο αναφοράς, το CO₂. Το υδρογόνο, η ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και η αμμωνία παρουσιάζουν ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα όταν συγκρίνονται οι εκπομπές στο συνολικό κύκλο ζωής. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου εξαλείφονται όταν καταναλώνονται αυτά τα εναλλακτικά καύσιμα σε κυψέλες καυσίμου ή σε συστήματα που αμιγώς υποστηρίζονται από μπαταρίες. Για τα καύσιμα που περιέχουν άνθρακα, δεν έχει εντοπιστεί προφανές πλεονέκτημα για τις άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Μεταξύ όλων των εναλλακτικών καυσίμων που περιέχουν άνθρακα, το LNG και το LBG αποδίδουν καλύτερα στη φάση Tank-to-Wheel λόγω της μικρότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα. Τα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία έδειξαν ότι η κατανάλωση καυσίμου LNG σε κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) θα μπορούσε να επιφέρει μείωση 20-30% στις εκπομπές CO₂ σε σύγκριση με το συμβατικό ναυτιλιακό πετρέλαιο. Ωστόσο, είναι εμφανείς οι ανησυχίες σχετικά με τις εκπομπές μεθανίου μέσω είτε των διαρροών ή λόγω ατελούς καύσης. Το μεθάνιο είναι το κύριο συστατικό του LNG και έχει υπολογιστεί ότι έχει 28 φορές το GWP του CO₂ σε διάστημα 100 ετών [118]. Οποιοσδήποτε σημαντικές διαρροές μεθανίου μπορούν να εξαλείψουν το πλεονέκτημα του LNG στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Perčić, et al., 2020).

Στη φάση της παραγωγής του καυσίμου, οι εκπομπές GHG εναλλακτικών καυσίμων ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με την μέθοδο που θα ακολουθηθεί για την παραγωγή και τις πρώτες ύλες ή πρωτογενή ενέργεια που θα χρησιμοποιηθεί. Οι εκπομπές των εναλλακτικών καυσίμων που δεν περιέχουν άνθρακα θα μπορούσαν να είναι ακόμη και υψηλότερες από το συμβατικό θαλάσσιο πετρέλαιο, όταν το εναλλακτικό καύσιμο παράγεται από ορυκτούς πόρους. Το LNG, το υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη που παράγονται από φυσικό αέριο έχουν παρόμοιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στον συνολικό κύκλο ζωής με το συμβατικό μαζούτ, ενώ μια αξιοσημείωτη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο συνολικό κύκλο

ζωής μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση του βιοντίζελ, της βιομεθανόλης, του βιομεθανίου, του πράσινου υδρογόνου και της πράσινης αμμωνίας. Η σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που επιτυγχάνεται στο συνολικό κύκλο ζωής στην περίπτωση των βιοκαυσίμων οφείλεται στην πρωτογενή ύλη βιομάζας, η οποία για να αναπτυχθεί απορροφά διοξείδιο του άνθρακα κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Τα πλοία που υποστηρίζονται από μπαταρίες ενδέχεται να αλλάξουν το παιχνίδι στην επιδίωξη της απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Οι Percic, Ančić και Vladimira (2020) αξιολόγησαν και συνέκριναν τον κύκλο ζωής των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των υβριδικών συστημάτων που λειτουργούν με μπαταρίες με άλλα εναλλακτικά καύσιμα και προσδιόρισαν το σύστημα που τροφοδοτείται από μπαταρίες από ηλεκτρική ενέργεια από την ξηρά ως την εναλλακτική λύση με τις χαμηλότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Τα πλοία που τροφοδοτούνται από μπαταρίες δεν παράγουν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη φάση λειτουργίας. Ωστόσο, δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα πραγματικό εναλλακτικό καύσιμο μηδενικών εκπομπών για θαλάσσια χρήση. Οι εκπομπές του κύκλου ζωής των πλοίων που λειτουργούν με μπαταρίες εξαρτώνται σημαντικά από τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα τροφοδοτεί τις μπαταρίες. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία υπογραμμίζει τις επιδράσεις της διαδικασίας και των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα αποτελέσματα των εκπομπών στο συνολικό κύκλο ζωής. Όταν οι πηγές που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο του μίγματος του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, το πλεονέκτημα των μπαταριών έναντι των εναλλακτικών καυσίμων περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό. Το υψηλό μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες της ΕΕ καθιστά την ηλεκτρική ενέργεια ένα πολλά υποσχόμενο εναλλακτικό καύσιμο για τα πλοία στην ΕΕ (Pereira & Posen, 2020).

4.3 Οικονομική Αξιολόγηση των Εναλλακτικών Καυσίμων

Εκτός από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής και τα τεχνολογικά ζητήματα των εναλλακτικών καυσίμων που εξετάστηκαν σε αυτή την εργασία, η εμπορική βιωσιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων θα παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του επιπέδου διάδοσης και ανάπτυξής τους. Επιπλέον, το κόστος κατασκευής/αγοράς συστημάτων πρόωσης συνδυάζεται με το κόστος των συστημάτων

αποθήκευσης καυσίμων επί του σκάφους για τον προσδιορισμό του συνολικού κόστους επένδυσης κεφαλαίου για τα συστήματα εναλλακτικών καυσίμων στα πλοία.

4.3.1. Κόστος καυσίμου

Η πιο αξιοσημείωτη διαφορά σήμερα μεταξύ της τιμής του LNG και της τιμής του αργού πετρελαίου είναι ότι η πρώτη διαφέρει σημαντικά μεταξύ των διαφόρων περιοχών του κόσμου. Ο Yegorov (2009) εξήγησε ότι οι διαφορές στις τιμές του φυσικού αερίου μπορεί να προέρχονται από το ίδιο το φυσικό αέριο, από επιρροές στην αγορά και από τους μηχανισμούς τιμολόγησης που χρησιμοποιούνται από τις τοπικές αγορές. Η βιομηχανία φυσικού αερίου σήμερα εξακολουθεί να στερείται καθολικών μηχανισμών τιμολόγησης. Η περιοχή της Ασίας-Ειρηνικού είναι τώρα η μεγαλύτερη αγορά για εισαγωγές LNG, αλλά αυτό δεν αποφέρει κανένα όφελος σε αυτές τις χώρες όσον αφορά την τιμή εισαγωγής LNG. Η περιοχή της Ασίας-Ειρηνικού έχει αυτήν τη στιγμή τις πιο ακριβές τιμές φυσικού αερίου μεταξύ όλων των μεγάλων αγορών φυσικού αερίου στον κόσμο. Μετά την οικονομική κρίση του 2008, η έκρηξη του σχιστολιθικού αερίου της Βόρειας Αμερικής και η συνακόλουθη πτώση της τιμής του φυσικού αερίου αύξησαν σε μεγάλο βαθμό τη βιωσιμότητα του LNG ως καυσίμου πλοίων. Η τιμή του LNG στην αγορά της Βόρειας Αμερικής μειώθηκε από περισσότερα από 12 US\$/MMBtu (εκατομμύρια βρετανικές θερμικές μονάδες) τον Δεκέμβριο του 2007 σε περίπου 3 US\$/MMBtu το 2017 και παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα (EIA, 2021). Όταν χρησιμοποιείται LNG ως καύσιμο πλοίων, θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη το τέλος ανεφοδιασμού. Σε μελέτη των Algeil et al. (2012) διεξήγαγε μια λεπτομερή ανάλυση των αλλαγών στην τροφοδοσία του LNG στα πλοία (bunkering) και η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι διαφορές κόστους στις μεθόδους τροφοδοσίας και την κατασκευή υποδομών τροφοδοσίας LNG στο λιμάνι θα μπορούσαν σήμερα να οδηγήσουν σε σημαντικές διαφορές στην τιμή του LNG. Το πρόσθετο κόστος προμήθειας αυτού του καυσίμου μπορεί να κυμαίνεται από 50 US\$/τόνο LNG έως 630 US\$/τόνο LNG.

Για το κόστος του υδρογόνου και της μεθανόλης θα πρέπει να εξεταστούν δύο σενάρια παραγωγής αυτών των εναλλακτικών καυσίμων: α) η περίπτωση της συμβατικής μεθόδου μέσω της ατμοαναμόρφωσης του φυσικού αερίου για παραγωγή υδρογόνου και β) η πράσινη οδός μέσω της παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του νερού που υποστηρίζεται ενεργειακά από ΑΠΕ. Γενικά, το κόστος παραγωγής καυσίμου

εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος της ενέργειας που απαιτείται. Οι Cloete και Hirth (2020) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η τιμή του υδρογόνου που παράγεται από τη μέθοδο SMR με 80% απόδοση μετατροπής είναι 1,25 φορές την τιμή του φυσικού αερίου συν 0,72 US\$/kg για το κόστος της πάγιας επένδυσης και τα λειτουργικά έξοδα. Για την παραγωγή υδρογόνου με χαμηλό κόστος από SMR, είναι σημαντικό να υπάρχει πρόσβαση σε φυσικό αέριο χαμηλής τιμής. Οι χαμηλές τιμές του φυσικού αερίου στη Μέση Ανατολή, τη Ρωσία και τη Βόρεια Αμερική δίνουν σε αυτές τις χώρες και περιοχές ένα πλεονέκτημα στην παραγωγή υδρογόνου από SMR. Αντίθετα, οι εισαγωγείς φυσικού αερίου στην Ασία, όπως η Ιαπωνία και η Κίνα, πρέπει να αντιμετωπίσουν υψηλότερες τιμές εισαγωγής φυσικού αερίου, γεγονός που συνεπάγεται υψηλότερο κόστος παραγωγής υδρογόνου. Έρευνα που διεξήχθη από το Παγκόσμιο Συμβούλιο Υδρογόνου έδειξε ότι το βέλτιστο κόστος του υδρογόνου από συστήματα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS), με περίπου 60% δέσμευση άνθρακα, θα μπορούσε να πέσει κάτω από 1,20 US\$/kg πριν από το 2025 στις γεωγραφικές περιοχές που έχουν πρόσβαση σε φθηνό φυσικό αέριο. Σε περιοχές όπως η ΕΕ, το υδρογόνο από SMR με CCS κοστίζει περίπου 2,1 US\$/kg και αυτό αναμένεται να μειωθεί σε 1,8 US\$/kg έως το 2030 (Hydrogen Council, 2020). Για το ανανεώσιμο υδρογόνο από την ηλεκτρόλυση, το κόστος παραγωγής υδρογόνου θα εξαρτηθεί από τα οικονομικά και την κλίμακα της παραγωγής, με τον πιο κρίσιμο παράγοντα να είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, το κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του νερού μπορεί να είναι χαμηλό περίπου 1,6 US\$/kg με χρήση ηλιακής ενέργειας στη Μέση Ανατολή (IEA., 2020). Για το Ηνωμένο Βασίλειο, η μακροπρόθεσμη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ είναι περίπου 65 £/MWh (περίπου 92 US\$/MWh), η οποία θα αντιστοιχεί σε κόστος παραγωγής υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, με ηλεκτρόλυση νερού, 3,25–3,66 £/kg (περίπου 4,61–5,19 US\$/kg). Το κόστος παραγωγής της αμμωνίας και της μεθανόλης ακολουθεί τις ίδιες τάσεις με το υδρογόνο. Η τιμή αγοράς της πρώτης ύλης είναι ο κυρίαρχος παράγοντας κόστους για τη συμβατική παραγωγή αμμωνίας και μεθανόλης. Το κόστος της πρώτης ύλης θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει περίπου το 65-85% του συνολικού κόστους παραγωγής (IEA., 2020)

Το κόστος παραγωγής του βιοντίζελ αποδίδεται σε μεγάλο βαθμό στη χημική τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο εργοστάσιο παραγωγής και στο κόστος της

πρώτης ύλης. Ορισμένες αναφορές μέχρι σήμερα έχουν εκτιμήσει το κόστος παραγωγής βιοντίζελ από διαφορετικές αλυσίδες αξίας, για παράδειγμα. Σήμερα, η παγκόσμια παραγωγή βιοντίζελ συγκεντρώνεται σε περιοχές της ΕΕ, των ΗΠΑ, της Ινδονησίας και της Βραζιλίας, οι οποίες μαζί συνεισέφεραν πάνω από τα τρία τέταρτα του βιοντίζελ που παρήχθη το 2019 σε παγκόσμιο επίπεδο [160]. Το βιοντίζελ από σόγια στις ΗΠΑ και τη Βραζιλία κοστίζει περίπου 0,42 US\$/L και 0,64 USD/L (Mizik & Gyarmati, 2021).

4.3.2. Αποθήκευση εναλλακτικών καυσίμων

Η αποθήκευση καυσίμων είναι μία από τις κύριες προκλήσεις για την ευρύτερη εφαρμογή του υδρογόνου στον τομέα της ναυτιλίας. Έχουν προταθεί πολυάριθμες τεχνικές για την αποθήκευση υδρογόνου στο πλοίο, από καθαρή φυσική αποθήκευση (αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου, αποθήκευση υγρού υδρογόνου) έως χημική αποθήκευση (αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια, αποθήκευση σε οργανικές ενώσεις Liquid Hydrogen Organic Carriers, χημική αποθήκευση). Μια γενική τάση με τις τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου είναι ότι το υδρογόνο υπό χημική αποθήκευση είναι λιγότερο εύκολα διαθέσιμο από τη φυσική αποθήκευση, απαιτείται υψηλότερη ενέργεια ή θερμοκρασίες για την απελευθέρωση του υδρογόνου όταν αυτό αποθηκεύεται με χημικό τρόπο σε άλλες ενώσεις (π.χ. αμμωνία, μεθανόλη, LHOC). Επίσης η αποθήκευση του LNG και του LBG ενέχει δυσκολίες λόγω της σχετικά χαμηλής ογκομετρικής τους πυκνότητας, η οποία είναι σαφώς υψηλότερη από εκείνη του υδρογόνου. Το LNG/LBG στο πλοίο αποθηκεύεται σε ένα ειδικά σχεδιασμένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για να διατηρεί το LNG στην υγρή του κατάσταση. Ο IMO έχει ορίσει τρεις βασικούς τύπους δεξαμενών (τύπου A, B, C), επιπλέον των δεξαμενών μεμβράνης για θαλάσσια χρήση. Οι δεξαμενές τύπου A, B και μεμβράνης δεν υπόκεινται σε πίεση και έχουν σχεδιαστεί για αποθήκευση LNG μεγάλου όγκου, οι δεξαμενές υπό πίεση τύπου C χρησιμοποιούνται γενικά σε μικρά πλοία λόγω της μικρής χωρητικότητας και δεν απαιτείται περαιτέρω φραγή για την διαρροή εξαμιζόμενων εκπομπών φυσικού αερίου (μεθανίου). Το εκτιμώμενο κόστος για ένα σύστημα αποθήκευσης τύπου IV 700 bar H₂ είναι μεταξύ 515 \$/kg σε όγκο παραγωγής 500.000 συστημάτων/έτος και 868 US\$/kg για 10.000 συστήματα/έτος. Για μια δεξαμενή αποθήκευσης μεγάλου μεγέθους, το κόστος για τη διαμόρφωση της δεξαμενής τύπου IV 700 bar με αποθήκευση 220 kg H₂ αναφέρεται σε 76.851

US\$/σκάφος (περίπου 349\$/kg). Οι δεξαμενές LNG/LBG με μεμβράνη χαμηλής πίεσης εκτιμάται ότι κοστίζουν 380 US\$/m³ για αποθήκευση 15.000–20.000 m³ LNG/LBG και 420 US\$/m³ για 10.000–15.000 m³ (MDA, et al., 2018).

Τα οικονομικά μειονεκτήματα των συστημάτων μπαταριών plug-in σχετίζονται κυρίως με το υψηλό κόστος πάγιας επένδυσης του συστήματος μπαταριών. Σε σύγκριση με τα συστήματα μπαταριών αυτοκινήτων, τα συστήματα μπαταριών σε πλοία εκτιμάται ότι έχουν υψηλότερο κόστος λόγω των αυστηρότερων απαιτήσεων για τη μόνωση και την ψύξη του εξοπλισμού, καθώς και την απαίτηση για πρόσθετα μέτρα πυρασφάλειας. Ως εκ τούτου, το τρέχον κόστος ενός συστήματος μπαταριών φωσφορικού σιδήρου λιθίου (LPF) υψηλής χωρητικότητας σε πλοία, όπως προτείνεται από μια μελέτη του EMSA είναι 500–1000 US\$/kWh. Η τιμή των μπαταριών λιθίου νικελίου οξειδίου του κοβαλτίου μαγγανίου (NMC), που είναι κατάλληλες για την ναυτιλία εφαρμογές, κυμαίνεται σε 1000 US\$/kWh (MDA, et al., 2018).

Συμπεράσματα

Με τις αυξανόμενες κυβερνητικές δεσμεύσεις για την επίτευξη ανθρακικής ουδετερότητας στην παγκόσμια οικονομία, η μετάβαση στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων και πηγών ενέργειας έχει γίνει μια ρεαλιστική επιλογή για τον τομέα της ναυτιλίας. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων και ενέργειας στα πλοία στην εποχή της ενεργειακής μετάβασης επικεντρώνεται στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τον ναυτιλιακό τομέα, αλλά μια τέτοια μετάβαση ενδέχεται να αγνοεί προς το παρόν τους άλλους πιθανούς κινδύνους που μπορεί να επιφέρει στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκαλείται από τη διαρροή εκπομπών αμμωνίας και οι επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία λόγω της τοξικότητας της αμμωνίας παραμένουν μια πιθανότητα που απαιτεί να προσεχθεί και να αντιμετωπιστεί (Brewer, 2019).

Αν και υπάρχουν πολλές διεθνείς συμβάσεις που καλύπτουν τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων και ενέργειας στην ναυτιλία, αυτή η εργασία διαπίστωσε ότι υπάρχουν αρκετές ελλείψεις και ανεπάρκειες στο τρέχον διεθνές νομικό πλαίσιο, που ενδέχεται να δημιουργήσουν δυσκολίες στη διαμόρφωση ενός αποτελεσματικού ρυθμιστικού πλαισίου για την αντιμετώπιση των αναδυόμενων προκλήσεων στην εποχή της ανθρακικής ουδετερότητας. Αυτές οι ελλείψεις περιλαμβάνουν κυρίως την περίπλοκη δομή του θεσμικού πλαισίου, την παράλληλη εφαρμογή διαφορετικών συμβάσεων καυσίμων και ενέργειας για πλοία πολλαπλών καυσίμων και υβριδικής ενέργειας, τις ελλείψεις στην πρόληψη της ρύπανσης και τον κανονισμό ασφάλειας ανεφοδιασμού καυσίμων, την έλλειψη διεθνών περιβαλλοντικών προτύπων που σχετίζονται με εναλλακτικά καύσιμα, τις ελλείψεις στο σύστημα ευθύνης και αποζημίωσης για ζημιές από τη ρύπανση και τον ανεπαρκή μηχανισμό διεθνούς συνεργασίας για την πρόληψη και την αντιμετώπιση της ρύπανσης.

Η παρούσα εργασία εξετάζει ορισμένους ειδικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους που μπορεί να υπάρχουν στη λειτουργία πλοίων που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα και τις ανεπάρκειες του υφιστάμενου διεθνούς νομικού καθεστώτος για την αντιμετώπιση αυτών των πιθανών κινδύνων. Εντούτοις, αν και η προοπτική του διεθνούς δικαίου παρέχει μία οπτική μέσω της οποίας αντικατοπτρίζεται η βελτίωση των ρυθμίσεων για τα πλοία με εναλλακτικά καύσιμα, το διεθνές δίκαιο από μόνο του δεν αποτελεί πανάκεια για την αντιμετώπιση όλων των σχετικών ειδικών περιβαλλοντικών κινδύνων, καθώς πολλά διεθνή νομικά κείμενα καθαυτά

δυσκολεύονται να αποτυπώσουν με σαφήνεια τον τρόπο επίλυσης προβλημάτων που σχετίζονται με τα συμβαλλόμενα μέρη, την έλλειψη νομικής δεσμευτικής ισχύος ή την αδυναμία εκπλήρωσης από τα συμβαλλόμενα μέρη. Επομένως, η διαμόρφωση ενός πιο αποτελεσματικού διεθνούς μηχανισμού απόκρισης για την αντιμετώπιση των ειδικών περιβαλλοντικών κινδύνων των πλοίων που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα περιλαμβάνει πολυδιάστατα ζητήματα που αφορούν την επιστήμη και την τεχνολογία, την πολιτική, την οικονομία και τις πολιτικές ισχύος στις διεθνείς σχέσεις. Κατά συνέπεια, απαιτείται περαιτέρω διεπιστημονική έρευνα για την βελτίωση των διεθνών οδηγιών και της νομοθεσίας σχετικά με το ρυθμιστικό πλαίσιο των πλοίων που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα. Βάσει των παραπάνω, αναμένεται στο άμεσο μέλλον το διεθνές δίκαιο να εκσυγχρονιστεί και να διαμορφωθεί ένα αποτελεσματικό θεσμικό και ρυθμιστικό πλαίσιο για τα εναλλακτικά καύσιμα σε πλοία που θα ανταποκρίνεται στην αντιμετώπιση των ειδικών περιβαλλοντικών κινδύνων.

Για να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές του τομέα της ναυτιλίας, οι κυβερνήσεις διερευνούν μέσα για να υποστηρίξουν εναλλακτικές επιλογές καυσίμων, όπως κόμβους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και πράσινους διαδρόμους (εμπορικές διαδρομές μεταξύ μεγάλων λιμενικών κόμβων), και η συνεργασία εντός της βιομηχανίας παραμένει κεντρικό σημείο εστίασης. Ο πρόσφατα εγκριθείς νόμος για τις επενδύσεις στις υποδομές και στις θέσεις εργασίας προσφέρει επίσης έναν οδηγό για πιθανές ευκαιρίες. Ωστόσο, η βιομηχανία εξακολουθεί να αναμένει λεπτομερείς οδικούς χάρτες στρατηγικής για το κλίμα, ενώ η σαφήνεια παραμένει αδιευκρίνιστη ως προς το εάν θα αναδειχθεί ένας "νικητής" στη γκάμα των εναλλακτικών επιλογών καυσίμων, αφήνοντας πολλές εναλλακτικές επιλογές καυσίμων να συνυπάρχουν και όλες με ελλείψεις σε άμεσα εφαρμόσιμους Κανονισμούς. Για το σκοπό αυτό, όσοι επιθυμούν να επενδύσουν στα εναλλακτικά καύσιμα θα πρέπει να είναι κατάλληλα προετοιμασμένοι για υψηλές επενδύσεις τόσο στην έρευνα όσο και στην ανάπτυξη πιλοτικών εφαρμογών εναλλακτικών καυσίμων σε πλοία, ώστε να προσεγγιστεί η απαραίτητη τεχνολογική ωριμότητα και οικονομική βιωσιμότητα για τέτοιες εφαρμογές (Pribyl, 2022).

Απαιτείται έρευνα, καινοτομία και επενδύσεις, σε θέματα όπως η διαθεσιμότητα σε επαρκείς ποσότητες εναλλακτικών καυσίμων και η δυνατότητα εφαρμογής των βέλτιστων τεχνολογιών σε όλη την αλυσίδα αξίας, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι πλοιοκτήτες θα μπορούν να χρησιμοποιούν τα εναλλακτικά καύσιμα με ασφάλεια σε

παγκόσμια κλίμακα στο εγγύς μέλλον. Μόλις αναπτυχθούν νέα και οικονομικά βιώσιμα καύσιμα, οι προμηθευτές καυσίμων και ενέργειας θα πρέπει να αρχίσουν να τα παράγουν και τα λιμάνια θα πρέπει να διαθέτουν τη σωστή υποδομή. Ωστόσο, τις επόμενες δεκαετίες, τα ορυκτά καύσιμα θα παραμείνουν πιθανότατα πολύ φθηνότερα από τα εναλλακτικά καύσιμα με μηδενικές εκπομπές άνθρακα, εκτός εάν τα πρώτα φορολογηθούν σε μεγάλο βαθμό μέσω των δικαιωμάτων CO₂ ή τα δεύτερα επιδοτηθούν σε σημαντικό βαθμό (ή και τα δύο). Γενικά, το ζήτημα των μακροοικονομικών επιπτώσεων των καυσίμων για τα πλοία που γίνονται πολύ πιο ακριβά (όπως και τα ίδια τα πλοία) είναι σημαντικό, μαζί με τις οικονομικές επιπτώσεις της απομάκρυνσης από ένα συμβατικό ορυκτό καύσιμο για τη ναυτιλία. Φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι οι τεχνολογίες που δεσμεύουν το μεγαλύτερο μέρος ή όλο το CO₂ από τα ορυκτά καύσιμα θα προκαλέσουν λιγότερες διαταραχές και θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραγγελίες για νεότευκτα πλοία με ημερομηνίες παράδοσης το 2023/2024 αποτελούνται κυρίως από ποντοπόρα πλοία, τα οποία μολονότι είναι ακριβά, θα μπορούν να χρησιμοποιούν «διπλό καύσιμο» και θα εναρμονίζονται με τα όρια εκπομπών NO_x Tier III. Ανάλογα με την έκταση του κατακερματισμού του μελλοντικού τοπίου των καυσίμων και τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου προς μια νέα κατάσταση, η στροφή σε ένα μέλλον πολλαπλών καυσίμων μπορεί στην πραγματικότητα να προαναγγέλλει το τέλος των φθηνών μεταφορών μέσω της θάλασσας (Wang & Wright, 2021).

Επίσης, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε μία ανασκόπηση των εναλλακτικών καυσίμων που έχουν εξεταστεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα της ναυτιλίας για να μειώσουν το ανθρακικό αποτύπωμα στις θαλάσσιες μεταφορές, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών των καυσίμων, των μεθόδων παραγωγής τους, των τεχνολογιών μετατροπής ενέργειας, της ενεργειακής απόδοσης, της περιβαλλοντικής απόδοσης, της οικονομικής βιωσιμότητας και των πολιτικών.

Με την ταχεία ανάπτυξη της υποδομής ανεφοδιασμού καυσίμων, το LNG είναι επί του παρόντος η κύρια εναλλακτική λύση στο ντίζελ και το βαρύ μαζούτ (MDO και HFO). Προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην μείωση των εκπομπών σε σχέση με τα παραδοσιακά καύσιμα πετρελαίου της ναυτιλίας. Η μετάβαση από τα συμβατικά καύσιμα πετρελαίου των πλοίων σε LNG θα μειώσει σημαντικά τους αέριους ρύπους (π.χ. SO_x, NO_x και PM₁₀) και θα συμβάλει στη επιδιωκόμενη συμμόρφωση με όλες τις τρέχουσες και προτεινόμενες απαιτήσεις μείωσης των εκπομπών. Ωστόσο, το LNG

έχει περιορισμένες δυνατότητες στη μείωση των εκπομπών GHG. Το πραγματικό όφελος στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από την χρήση του LNG στα πλοία ανέρχεται σε περίπου 8–20% σε σύγκριση με το HFO και το MGO, όταν λαμβάνονται υπόψη οι αναπόφευκτες διαρροές μεθανίου. Ο στόχος μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% δεν μπορεί να επιτευχθεί με τη μετάβαση μόνο στο LNG, αλλά πρέπει να συνδυαστεί με άλλες προσπάθειες, όπως η ανάμειξη με LBG.

Τα βιοντίζελ ως εναλλακτική λύση είναι εμπορικά διαθέσιμο τουλάχιστο για χρήση σε οχήματα και φορτηγά. Στην παρούσα εργασία εντοπίστηκαν μερικά τεχνικά και οικονομικά εμπόδια στη χρήση βιοντίζελ στον τομέα της ναυτιλίας. Το βιοντίζελ δύναται να καταναλωθεί απευθείας στους υφιστάμενους κινητήρες πλοίων με μικρές τροποποιήσεις. Ωστόσο, εγείρονται θέματα βιωσιμότητας αν ληφθεί υπόψη ο συνολικός κύκλος ζωής και το δίλλημα «τροφήμα ή καύσιμα», εφόσον το βιοντίζελ πρώτης γενιάς παράγεται από ελαιούχες καλλιέργειες. Η μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη χρήση βιοντίζελ ποικίλλει ευρέως ανάλογα με τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται. Το βιοντίζελ δεύτερης γενιάς από φυτικά έλαια και ανανεώσιμες πηγές θεωρείται ότι έχει υψηλότερο δυναμικό στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, ωστόσο δεν παράγεται σε υψηλές ποσότητες για να καλύψει τις ανάγκες της ναυτιλιακής αγοράς.

Το υδρογόνο και η αμμωνία έχουν θεωρηθεί ως δυνητικά εναλλακτικά καύσιμα για διάφορες χρήσεις. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος και οι χαμηλές εκπομπές κατά τη χρήση καθιστούν το υδρογόνο μια πιθανή λύση για την πλήρη απανθρακοποίηση της ναυτιλίας. Ωστόσο, τα κύρια εμπόδια αφορούν τα υψηλά κόστη πάγιας επένδυσης και η αβεβαιότητα στον ανεφοδιασμό που αναμένεται βραχυπρόθεσμα να παρεμποδίσουν την ευρεία υιοθέτηση του υδρογόνου ως εναλλακτικό καύσιμο στην ναυτιλία. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σε ισχύ των ποντοπόρων πλοίων, όταν υπολογίζεται το κόστος του συστήματος αποθήκευσης καυσίμου επί του σκάφους, το υδρογόνο και οι κυψέλες καυσίμου είναι ένας από τους πιο ακριβούς συνδυασμούς καυσίμου και συστήματος προώσεως σε πλοιά. Επιπλέον, απαιτούνται νέες υποδομές και δίκτυα διανομής για τη μεγαλύτερη ανάπτυξη και διάδοση του υδρογόνου. Οι υπάρχουσες υποδομές LNG ενδέχεται να μετασχηματιστούν για διανομή υδρογόνου, αλλά η σκοπιμότητα από οικονομικής και τεχνολογικής άποψης πρέπει να διερευνηθεί με περαιτέρω έρευνα. Η αμμωνία, η οποία έχει υψηλή κατά βάρος περιεκτικότητα σε υδρογόνο και αποθηκεύεται και διανέμεται

εύκολα, έχει λάβει αυξανόμενη προσοχή από τους ερευνητές. Για να γίνει πραγματικότητα η χρήση αμμωνίας στην ναυτιλία θα πρέπει να ξεπεραστούν αρκετά βασικά τεχνολογικά εμπόδια και ζητήματα ασφάλειας στο σχεδιασμό συστημάτων πρόωσης με αμμωνία, συμπεριλαμβανομένων των κακών ιδιοτήτων καύσης και της τοξικότητάς της.

Με ένα αυξανόμενο μερίδιο ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στο παγκόσμιο δίκτυο, τα πλοία που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια από την ξηρά παρουσιάζουν πιθανά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Όταν ένα πλοίο με μπαταρία φορτίζεται με ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, θα έχει πολύ χαμηλό αντίκτυπο στο κλίμα σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας και ουσιαστικά δεν θα έχει εκπομπές καυσαερίων κατά τη λειτουργία του. Τα τελευταία χρόνια, έχει σημειωθεί πρόοδος στην ανάπτυξη πλοίων που λειτουργούν με μπαταρίες, αλλά οι τεχνικές δυσκολίες, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας σε ογκομετρικούς και βαρυμετρικούς όρους και σχετικά μικρής διάρκειας ζωής, πρέπει να ξεπεραστούν για χρήση σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Το γεγονός αυτό καθιστά τα συστήματα πρόωσης με μπαταρίες πιο κατάλληλα για πλοία ελαφρού τύπου ή για χρήση ως βοηθητική πρόωση επί του σκάφους, π.χ. στην περίπτωση πλοήγησης του πλοίου μέσα στα λιμάνια.

Η μεθανόλη είναι γνωστή ως πιθανή εναλλακτική λύση εδώ και αρκετό καιρό. Η μεθανόλη παρουσιάζει οικονομικά πλεονεκτήματα λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής, αποθήκευσης, μεταφοράς και τροποποίησης του κινητήρα. Η αποθήκευση της μεθανόλης υπόκειται ουσιαστικά στις ίδιες διατάξεις με εκείνες που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση πετρελαίου. Η μεθανόλη θα μπορούσε να αποθηκευτεί σε δεξαμενές κατασκευασμένες από μαλακό χάλυβα ή ανοξείδωτο χάλυβα και χωρίς πίεση. Οι υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης HFO/MGO μπορούν να μετατραπούν σε μικρό βαθμό ώστε να διαχειρίζονται τη μεθανόλη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα συμβατικά συστήματα κινητήρων με ντίζελ μπορούν να μετατραπούν για να τροφοδοτούνται με μεθανόλη με κόστος ανακατασκευής περίπου 300\$/kW.

Από άποψη του συνολικού κύκλου ζωής ενός εναλλακτικού καυσίμου (παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά, χρήση), η μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη διεργασία

παραγωγής και τις πρώτες ύλες ή πρωτογενή ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα μέσω συμβατικών μεθόδων που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα δεν θα είναι τόσο αποτελεσματική στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής γιατί απλά θα μετατοπίσει τις εκπομπές από το πλοίο σε προγενέστερα στάδια της αλυσίδας αξίας. Το ανθρακικό αποτύπωμα μπορεί να μειωθεί δραματικά μόνο όταν τα εναλλακτικά καύσιμα, όπως το υδρογόνο, η αμμωνία ή ηλεκτρική ενέργεια που θα φορτίσει τις μπαταρίες προέρχονται από ΑΠΕ. Οι τρόποι για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις μπορεί να βρίσκονται πέρα από το πεδίο εφαρμογής του ίδιου του τομέα της ναυτιλίας. Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν κίνητρα για τα ενδιαφερόμενα μέρη να υιοθετήσουν πράσινα εναλλακτικά καύσιμα από ΑΠΕ.

Τα εναλλακτικά καύσιμα είναι απαραίτητα για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές της διεθνούς ναυτιλίας. Ωστόσο, δεν υπάρχει επί του παρόντος καμία ενιαία διαδρομή ικανή να προσφέρει αξιοσημείωτη μείωση εκπομπών σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού καυσίμων με τρόπο ανταγωνιστικό ως προς το κόστος σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων με βάση το πετρέλαιο. Απαιτείται ένα μακροπρόθεσμο, συνεπές και αποτελεσματικό πλαίσιο πολιτικής για την προώθηση της υιοθέτησης εναλλακτικών καυσίμων και τεχνολογιών πρόωσης στα πλοιά. Ενώ οι προσπάθειες για τον έλεγχο των εκπομπών από τη ναυτιλία υπό την ηγεσία του IMO κατά την τελευταία δεκαετία ήταν υψίστης σημασίας, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος μηδενικών εκπομπών στην ναυτιλία, ο IMO και τα κράτη μέλη του πρέπει να εξετάσουν παράλληλα μια πληθώρα δημόσιων και ιδιωτικών πρωτοβουλιών. Τα μέτρα που ισχύουν αναφορικά με την ένταξη της ναυτιλίας στο EU-ETS από το 2022 και ο φόρος NOx που επιβλήθηκε από τη Νορβηγική κυβέρνηση μπορούν να αποτελέσουν πιλότους για την υιοθέτηση των βέλτιστων πρακτικών προς την κατεύθυνση επίτευξης ανθρακικής ουδετερότητας στον παγκόσμιο τομέα της ναυτιλίας.

Βιβλιογραφία

- Algelli, J., Bakosch, A. & Forsman, B., 2012. *Forsman, B. Feasibility Study on LNG Fuelled Short Sea and Coastal Shipping in the Wider Caribbean Region; SSPA: Goteborg, Sweden.* s.l.:s.n.
- Becker, M., 2005. The shifting public order of the oceans: Freedom of navigation and the interdiction of ships at sea.. *Harvard Int. Law J.* 46, 131–230..
- Bioenergy., E., 2020. Use of Biofuels in Shipping. Biofuelstp.eu. 2020. Available online: https://www.etipbioenergy.eu/?option=com_content&view=article&id=294 (accessed on 8 April 2021)..
- Brewer, T., 2019. *Black carbon emissions and regulatory policies in transportation. Energy Policy*, 129, 1047–1055. [CrossRef]. s.l.:s.n.
- Cardoso, J. και συν., 2021. Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines.. *J. Clean. Prod.*, 296, 126562..
- Cengiz Deniz & Zincir, B., 2016. Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*.
- Churchill R., Lowe V. & A., S., 2022. *The law of the Sea* (Manchester: Manchester University Press)..
- Cloete, S. & Hirth, L., 2020. *Flexible power and hydrogen production: Finding synergy between CCS and variable renewables. Energy*, 192, 116671. s.l.:s.n.
- Convention, O., 2018. *International convention on oil pollution preparedness, response and Co-operation (OPRC convention)*.. Available at: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-Oil-Pollution-Preparedness,-Response-and>: s.n.
- Correa, D. και συν., 2019. Towards the implementation of sustainable biofuel production systems.. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 107, 250–263..
- Cowan, J., 2015. *Preventing Loss of Propulsion After Fuel Switch to Low Sulfur Distillate Fuel*.. s.l.:s.n.
- Dalena, F. και συν., 2018. Chapter 1—Methanol Production and Applications: An Overview. In *Methanol*; Basile, A., Dalena, F., Eds. *Elsevier: Amsterdam, The Netherlands*; pp. 3–28..
- DNV, 2018. Alternative fuels: the options. *Maritime impact*.
- DNV, 2019. *Energy Transition Outlook*.
- EIA, 2021. *Henry Hub Natural Gas Spot Price*. Available online: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm> (accessed on 11 May 2021).. s.l.:s.n.
- EMSA, 2019. *EMSA Facts & Figures 2019*.
- Englert D., Losos A., Raucci C. & T., S., 2021. *Washington: World Bank*. s.l.:s.n.
- Euronav, 2017. *The Basics of the Tanker Shipping Market*.
- European Commission, 2022. *New shipping fuel standards to reduce sulphur air pollutants in the Mediterranean by 80%*. s.l.:s.n.

European Commission (EC). , 2016. *Reducing Emissions from the Shipping Sector*. Available online: <https://climate.ec.europa.eu/>. s.l.:s.n.

Eurostat, 2021. Heavy fuel oil - production, trade and use. *eurostat*.

Evangelista, J., 2002. WS50. Surveyor. Houston: American Bureau of Shipping.

Fossi M. C., και συν., 2020. *Assessing and mitigating the harmful effects of plastic pollution: The collective multi-stakeholder driven Euro-Mediterranean response..* Ocean Coast. Manage. 184, 1050: s.n.

Gallucci, M., 2018. *At Last, the Shipping Industry Begins Cleaning Up Its Dirty Fuels*. YALE Environment 360: s.n.

GmbH, H. T., 2018. *Reactor apparatus for dehydrogenating a carrier medium*. s.l.:s.n.

Handrlica, J., 2019. Transportable nuclear power plants: an enigma of international nuclear liability law. *J. World Energy Law Business* 12, 465–479. doi: 10.1093/jwelb/jwz018.

Hoyland, R. & McDonell, P., 2021. Decarbonisation and shipping: alternative fuels. *Hill Dickinson LLP* .

Hui Xing, Charles Stuart, Stephen Spence & Hua Chen, 2021. Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*.

Humpert, M., 2022. Russia and Canada Opt Out of Voluntary Heavy Fuel Oil Ban for Arctic. *High North News*.

Hutchins, 2021. Crafting an international legal framework for renewable energy on the high seas.. *Environ. Law*. 51, 485–514. Available at: <https://www.jstor.org/stable/27027147>..

Hydrogen Council, 2020. *Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective..* s.l.:s.n.

Ibrahim Dincer & Bicer, Y., 2018. Partial oxidation of heavy oil-based ammonia production. *Comprehensive Energy Systems*.

IEA., 2020. *Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for Organic Growth*. s.l.:s.n.

IEA., 2020. *World Energy Outlook 2020*. s.l.:s.n.

IMO, 2015. IMO Secretary-General launches “Maritime education and training” theme at World Maritime University..

IMO, 2018. IMO’s work to cut GHG emissions from ships.

IMO, 2021. World Maritime theme 2022: New technologies for greener shipping.

International Law Commission , 2006. *Draft principles on the allocation of loss in the case of transboundary harm arising out of hazardous activities 2006..* Available at: <https://cil.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2021/08/2006-Draft-Principles-on-the-Allocat>: s.n.

IRENA, 2020. *Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi*. s.l.:s.n.

- Kuczyński, S., Łaciak, M., Szurlej, A. & Włodek, T., 2020. Impact of Liquefied Natural Gas Composition Changes on Methane Number as a Fuel Quality Requirement.. *Energies* 2020, 13, 5060..
- Lee, D. & Song, H., 2018. Development of combustion strategy for the internal combustion engine fueled by ammonia and its operating characteristics.. *J. Mech. Sci. Technol*, 32, 1905–1925. .
- Leonzio, G., Zondervan, E. & Foscolo, P., 2019. Methanol production by CO₂ hydrogenation: Analysis and simulation of reactor performance.. *Int. J. Hydrogen Energy* 2019, 44, 7915–7933. .
- Li, H., Mehmood, D., Thorin, E. & Yu, Z., 2017. Biomethane production via anaerobic digestion and biomass gasification.. *Energy Procedia*, 105, 1172–1177..
- MAN, 2022. MAN 49/60DF engine. Available at: <https://www.man-es.com/marine/products/man-49-60> (Accessed 15 October 2022)..
- MDA, A. και συν., 2018. *Techno-Economic Feasibility Study of Battery- Powered Ferries. In Proceedings of the 4th Southern Power Electronics Conference (SPEC 2018), Singapore, 10–13 Dec.* s.l.:s.n.
- Mihail–Vlad, V., 2019. *Flettner Rotors. J. Mar. Technol. Environ. Year*, 2, 75. s.l.:s.n.
- Mizik, T. & Gyarmati, G., 2021. *Economic and Sustainability of Biodiesel Production—A Systematic Literature Review. Clean Technol.* 2021, 3, 19–36.. s.l.:s.n.
- Nikolaidis, P. & Poullikkas, A., 2017. *A comparative overview of hydrogen production processes, Renewable Sustainable Energy Rev.* s.l.:s.n.
- Parker, B., 2021. *The Shipping Industry Embraces Battery Power. Maritime Activity Reports*,: s.n.
- Perčić, M., Ančić, I. & Vladimir, 2020. *Life-cycle cost assessments of different power system configurations to reduce the carbon footprint in the Croatian short-sea shipping sector.. Renew. Sustain. Energy Rev.*, 131, 11002. : s.n.
- Pereira, L. & Posen, I., 2020. *Lifecycle greenhouse gas emissions from electricity in the province of Ontario at different temporal resolutions. J. Clean. Prod.*, 270, 122514. s.l.:s.n.
- Pribyl, S. T., 2022. Decarbonization of shipping – emerging alternative fuels from a US perspective. *Gard*.
- R. Halim, R., L. Kirstein, L., Merk, O. & Martinez, L., 2018. *R.Decarbonization Pathways for International Maritime Transport: A Model-Based Policy Impact Assessment.* Sustainability: s.n.
- Raucci, C., 2017. *The Potential of Hydrogen to Fuel International Shipping. Ph.D. Thesis, UCL (University College London), London,* s.l.:s.n.
- Ren, X., Kong, Z. & Liang, W. e. a., 2017. Vehicle Scheduling Based on Plant Growth Simulation Algorithm and Distribution Staff Behavior.. *Advances in Production Engineering & Management*, 12, 173-184..

- Rudolph T. B., και συν., 2020. *A transition to sustainable ocean governance*. *Nat. Commun.* 11, 3600. doi: 10.1038/s41467-020-17410-2. s.l.:s.n.
- Sands P., Peel J., Fabra A. & R., M., 2018. *Principles of international environmental law* (Cambridge: Cambridge University Press). doi: 10.1017/9781108355728. s.l.:s.n.
- Selma K Bengtsson, Erik Fridell & Andersson, K. E., 2013. Fuels for short sea shipping: A comparative assessment with focus on environmental impact. *Sage Journals*.
- Shaw, J., 2017. Tank Ship Development and the birth of the American oil tanker. *Ships Monthly*: 26–31.
- Silitonga, A. και συν., 2013. Experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with Ceiba pentandra biodiesel blends.. *Energy Convers. Manag.* 76, 828–836.
- Song, T. H., 2021. A preliminary study of the international legal issues arising from china's plans to deploy FNPPs in the south China Sea," in Marine scientific research, new marine technologies and the law of the Sea. Eds. Zou K., Telesetsky A. (Leiden.
- Tanaka, H. & Okada, 2019. *Effects of market-based measures on a shipping company: Using an optimal control approach for long-term modeling*. *Res. Transp. Econ.* s.l.:s.n.
- Tanaka, Y., 2019. *The international law of the Sea* (Cambridge: Cambridge University Press)..
- UNCLOS, 1982. *United nations convention on the law of the Sea.* , s.l.: s.n.
- Valera-Medina A., και συν., 2018. *Ammonia for power*. *Prog. Energy Combustion Sci.* 69, 63–102. doi: 10.1016/j.pecs.2018.07.001. s.l.:s.n.
- Wang, Y. & Wright, L. A., 2021. *A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation*. World: s.n.
- World Maritime News, 2019. "IMO Moves to Ban HFO from Arctic Shipping | World Maritime News". *worldmaritimeneeds.com*. Retrieved 4 April 2019..
- Xue, H., 2003. *Transboundary damage in international law* (New York: Cambridge University Press). doi: 10.1017/CBO9780511494642. s.l.:s.n.
- Yegorov, Y., 2009. *Socio-economic influences of population density*. *Chin. Bus. Rev.* 8, 1–12. s.l.:s.n.
- Zamfirescu, C. & Dincer, I., 2008. Using ammonia as a sustainable fuel. *J. Power Source* 2008, 185, 459–465..
- Zamfirescu, C. & Dincer, I., 2009. Ammonia as a green fuel and hydrogen source for vehicular applications.. *Fuel Process. Technol.*, 90, 729–737. .
- Zhang, H. και συν., 2020. Techno-economic comparison of green ammonia production processes. *Appl. Energy* 2020, 259, 114135..
- Zincir, B., Deniz, C. & Tunér, M., 2019. Investigation of environmental, operational and economic performance of methanol partially premixed combustion at slow speed operation of a marine engine.. *J. Clean. Prod.* 235, 1006–1019..

