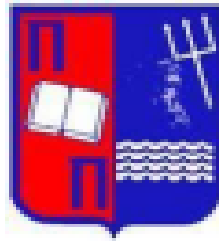


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ



ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟ
ΚΑΥΣΙΜΟ

Όνοματεπώνυμο: Παρασκευή Καψάλη

Αριθμός Μητρώου : MN21034

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ναυτιλία

Πειραιάς

ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ/ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

«Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στη βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (μη-εμπορικός, μη κερδοσκοπικός, εκπαιδευτικός, ερευνητικός), της φύσης του υλικού, που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

«Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΓΣ του Τμήματος Ναυτιλιακών Σπουδών Πανεπιστημίου Πειραιώς σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Ναυτιλία.

Τα μέλη της Επιτροπής:

- Καθ. Ερνέστος Τζαννάτος (Επιβλέπων)
- Καθ. Παπαδημητρίου Ευστράτιος
- Επίκ. Καθ. Χατζηνικολάου Στέφανος

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα.»

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	6
Εισαγωγή	7
Κεφάλαιο 1ο : Κλιματική αλλαγή & Ναυτιλία.....	11
1.1. Οι επιπτώσεις της ναυτιλίας (εκπομπές CO ₂) στην κλιματική αλλαγή	11
1.2. Ενέργεια & καύσιμα μηδενικού άνθρακα στα πλοία (ηλεκτρικά πλοία, αμμωνία & υδρογόνο)	18
Κεφάλαιο 2ο : Το υδρογόνο ως ναυτιλιακό καύσιμο	35
2.1. Το υδρογόνο ως ναυτιλιακό καύσιμο για τη μείωση του αερίου του θερμοκηπίου	35
2.2. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου	36
2.3. Αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου	38
2.4. Η χρήση του υδρογόνου ως ναυτιλιακού καυσίμου σε μηχανές εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου.....	41
Κεφάλαιο 3ο :Η νομοθεσία για την χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου στην ναυτιλία	57
3.1 Κανονισμοί IMO	57
3.2.Διεθνείς κανονισμοί και πρότυπα.....	63
3.3. Κανόνες ABS για το υδρογόνο	65
3.4 Κώδικες IGF και IGC	Error! Bookmark not defined.
Κεφάλαιο 4ο :Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση της χρήσης υδρογόνου ως καυσίμου στα νεότευκτα και υπάρχοντα πλοία	67
4.1. Κόστος εγκατάστασης (μετασκευή & νέα).....	68
4.2. Κόστος λειτουργίας (συντήρηση & κατανάλωση καυσίμου).....	70
4.3. Σύγκριση με συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες πλοίων	73
Συμπέρασμα.....	79
Βιβλιογραφία	85

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το υδρογόνο ως ναυτιλιακό καύσιμο και πως αυτό μπορεί να συμβάλει στη βιωσιμότητα της ναυτιλίας.

Αναλυτικότερα, το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στους λόγους που επιβάλουν την μετάβαση της ναυτιλίας στη χρήση καυσίμων μηδενικού άνθρακα, δηλ. στην επίπτωση των συμβατικών ναυτιλιακών καυσίμων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην κλιματική αλλαγή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου στην ναυτιλία και πιο συγκεκριμένα: τι είναι, πως παράγεται, πως αποθηκεύεται, πως μεταφέρεται και πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου.

Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει τη διεθνή νομοθεσία και τους κανονισμούς που αφορούν στη χρήση του υδρογόνου ως ναυτιλιακού καυσίμου.

Το τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας θα αναφέρεται στην τεchnο-οικονομική αξιολόγηση της εφαρμογής του υδρογόνου ως καυσίμου στα πλοία, με αναφορά τόσο στο αρχικό όσο και στο λειτουργικό κόστος της ενεργειακής εγκατάστασης και χρήσης.

Τέλος, η εργασία κλείνει παραθέτοντας κάποια συμπεράσματα πάνω στο υπό εξέταση ζήτημα.

Λέξεις - κλειδιά: υδρογόνο, εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα, κλιματική αλλαγή, IMO, τεchnο-οικονομική αξιολόγηση.

Abstract

This paper deals with hydrogen as a marine fuel and how this can contribute to the sustainability of shipping.

More specifically, the first chapter refers to the reasons that require the transition of shipping to the use of zero carbon fuel, i.e. the impact of conventional marine fuels on the greenhouse effect and climate change.

The second chapter develops the use of hydrogen as a fuel in shipping and more specifically: what it is, how it is produced, how it is stored, how it is transported and how it can be used in internal combustion engines and fuel cells.

The third chapter analyzes international legislation and regulations relating to the use of hydrogen as a marine fuel.

The fourth chapter of the work refers to the techno-economic assessment of the implementation of hydrogen as fuel for ships, with reference to both the original and operating cost of installation and use.

Finally, the work closes by listing some conclusions on the issue in question.

Keywords: Hydrogen, alternative maritime fuels, climate change, IMO, techno-economic evaluation.

Εισαγωγή

Πάνω από το 90% του διεθνούς εμπορίου (κατά όγκο) διεξάγεται μέσω της ναυτιλίας με την συνδρομή περίπου 90 χιλιάδων πλοίων παντός τύπου. Όπως όλα τα μέσα μεταφοράς που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, έτσι και τα πλοία παράγουν καυσαέριες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που ως αέριο του θερμοκηπίου συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη και συνεπώς στην κλιματική αλλαγή. Εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα πλοία εκπέμπουν επίσης και άλλα καυσαέρια, όπως το διοξείδιο του θείου (SO₂), το οξείδιο του αζώτου (NO_X) καθώς και αιωρούμενα σωματίδια (PM) που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα και επιβαρύνουν την ποιότητα του αέρα με αρνητικές συνέπειες στην γλωρίδα, στην πανίδα καθώς στην ανθρώπινη υγεία. Έχει εκτιμηθεί ότι οι καυσαέριες εκπομπές της ναυτιλίας ευθύνονται για περίπου 60 χιλιάδες καρδιοπνευμονικούς θανάτους κάθε χρόνο (ICCT, 2007) .

Οι προαναφερόμενες αρνητικές επιπτώσεις είναι συνυφασμένες κυρίως με την διαχρονικά αποκλειστική χρήση του βαριού πετρελαίου (Heavy Fuel Oil, HFO) ως καυσίμου των μηχανών πρόωσης του πλοίου και των ελαφρότερων πετρελαίων (MGO και MDO) στις ναυτικές ντιζελογεννήτριες. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία των ναυτικών ντιζελομηχανών συνάδει με τη δυνατότητα επίτευξης υψηλών θερμοκρασιών καύσης, η οποία μολονότι συμβάλει στην υψηλή θερμική απόδοση αυτών των μηχανών, οδηγεί ταυτόχρονα στην παραγωγή υψηλών ποσοτήτων θερμικού οξειδίου του αζώτου (thermal NO). Η χρήση αυτών των καυσίμων στα πλοία είναι ιδιαίτερα ελκυστική για τη ναυτιλία λόγω του συγκριτικά χαμηλού τους κόστους, της ευρείας διαθεσιμότητας τους, καθώς και της σχετικά ευχερούς αποθήκευσης και επεξεργασίας τους επί του πλοίου.

Η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι υπεύθυνη για ένα σημαντικό ποσοστό της κλιματικής αλλαγής. Σύμφωνα με τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), η ναυτιλία ευθύνεται για περίπου το 2,5% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Αυτός ο αριθμός βασίζεται στα πιο πρόσφατα διαθέσιμα στοιχεία από τον IMO, ο οποίος εκτιμά ότι οι συνολικές εκπομπές από τη ναυτιλία ήταν περίπου 1,2 δισεκατομμύρια τόνοι CO₂ το 2018 (IMO, 2018). Το ποσοστό αυτό είναι συγκρίσιμο

με τις αντίστοιχες εκπομπές μιας σειράς ανεπτυγμένων χωρών, καταλαμβάνοντας την έκτη θέση μετά από τις ΗΠΑ, την Κίνα, τη Ρωσία, την Ινδία και την Ιαπωνία.

Επίσης, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει θεσπίσει κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τα ποντοπόρα πλοία μέσω του Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) και του Σχεδίου Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίων (SEEMP).

Ο EEDI καθορίζει ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης για νέα πλοία και υπολογίζεται με βάση τη γραμμή αναφοράς που καθορίζεται από τον IMO. Η γραμμή αναφοράς βασίζεται στον μέσο όρο των πλοίων με τις καλύτερες επιδόσεις σε συγκεκριμένο τύπο και μέγεθος πλοίου και ο EEDI υπολογίζεται συγκρίνοντας το σχέδιο ενός πλοίου με αυτήν τη γραμμή αναφοράς. Τα νέα πλοία απαιτείται να πληρούν μια συγκεκριμένη τιμή EEDI, η οποία γίνεται πιο αυστηρή με την πάροδο του χρόνου. Ο εν λόγω δείκτης απαιτεί ένα ελάχιστο βαθμό απόδοσης ανά μίλι μεταφοράς για διαφορετικά φορτία και πλοία. Ο EEDI μετριέται σε γραμμάρια CO₂ ανά μίλι χωρητικότητας, υπολογίζεται με βάσει τις τεχνικές προδιαγραφές του πλοίου, όσο μικρότερος είναι τόσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι το πλοίο και η τιμή του δίνεται από την ακόλουθη

$$\text{μαθηματική σχέση: EEDI} = \frac{\text{CO}_2 \text{ emitted (grams)}}{\text{Deadweight (tons)} \times \text{Distance travelled (Nautical Miles)}}$$

Το SEEMP, από την άλλη πλευρά, είναι ένα σχέδιο που αναπτύσσεται και εφαρμόζεται από τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των υπαρχόντων πλοίων. Περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, μέτρα όπως αργό άτμισμα, βελτιστοποίηση διαδρομής και καθαρισμό γάστρας. Περιλαμβάνει, επίσης, απαιτήσεις παρακολούθησης και αναφοράς για να διασφαλιστεί ότι το σχέδιο εφαρμόζεται αποτελεσματικά και ότι η ενεργειακή απόδοση του πλοίου βελτιώνεται συνεχώς (IMO, 2018). Ο Διεθνής Θαλάσσιος Οργανισμός έθεσε φιλόδοξους στόχους τον Απρίλιο του 2018 στην ανάλυση της Επιτροπής Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος. Η στρατηγική του Διεθνούς Θαλάσσιου Οργανισμού περιλαμβάνει στόχους για τη μείωση των μέσων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά μεταφορά από τα επίπεδα του 2008 κατά τουλάχιστον 40 % έως το 2030 και 70 % έως το 2050. Αυτοί οι στόχοι επιδιώκουν επίσης να μειώσουν την συνολική ετήσια παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία κατά τουλάχιστον 50 % μέχρι το 2050.

Πολλές τεχνολογίες θεωρούνται ότι μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα από τη ναυτιλία. Το αμερικανικό γραφείο ναυτιλίας έχει κατηγοριοποιήσει τις διαθέσιμες επιλογές θαλάσσιων καυσίμων για να επιτευχθεί μείωση της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα κατά τις ναυτιλιακές μεταφορές. Μεταξύ αυτών, το υδρογόνο (υδροποιημένο LH_2 ή αέριο H_2) αναγνωρίζεται ως καύσιμο χαμηλού έως μηδενικού άνθρακα που μπορεί να βοηθήσει στην κάλυψη του στόχου μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σύμφωνα με τον Διεθνή Θαλάσσιο Οργανισμό μέχρι το 2050. Το υδρογόνο προσφέρει χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και χαμηλή εκπομπή σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου (National Renewable Energy Laboratory, 2021).

Το υδρογόνο συνήθως βρίσκεται φυσικά ως ένωση είτε του νερού είτε του μεθανίου. Για να αποκτηθεί καθαρό υδρογόνο, το στοιχείο πρέπει να διαχωριστεί από αυτές τις ενώσεις. Σε τυποποιημένες συνθήκες, το υδρογόνο είναι ένα άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη τοξικό, σχετικά μη αντιδραστικό και εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο. Το υδρογόνο παράγεται συνήθως με τη μετατροπή του φυσικού αερίου ή του άνθρακα σε αέριο υδρογόνου και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), αν και για τους μακροπρόθεσμους στόχους βιωσιμότητας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Στην κατασκευή, το υδρογόνο χρησιμοποιείται τυπικά για χημική παραγωγή ή ως βιομηχανική πρώτη ύλη. Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία έχει αναγνωρίσει τη δυνατότητα του υδρογόνου να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυττάρων καυσίμου και τεχνολογιών καύσης. Ενώ σε πολλές περιπτώσεις το υδρογόνο μπορεί να προκύψει από τη μετατροπή καυσίμου ενός φορέα υδρογόνου (και ως εκ τούτου, μπορεί να έχει άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου), σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου που καταναλώνει καθαρή παροχή καυσίμου υδρογόνου, δεν εκπέμπονται αέρια θερμοκηπίου. Σε κινητήρες καύσης ή αεριοστρόβιλους, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στο σημείο αυτό πρέπει να λεχθεί ότι οι αεριοστρόβιλοι που καταναλώνουν υδρογόνο (ή μείγματα υδρογόνου με φυσικό αέριο) χρησιμοποιούνται κυρίως για παραγωγή ενέργειας στις χερσαίες κυρίως μεταφορές (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2021).

Ενώ το υδρογόνο φαίνεται να είναι ένα ιδανικό καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, έχει διάφορες προκλήσεις σχετικά με την αποθήκευση του και τον κίνδυνο

πυρκαγιάς. Για να γίνει ένα ανταγωνιστικό εναλλακτικό θαλάσσιο καύσιμο, το υδρογόνο πρέπει να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις της διαθεσιμότητας και το υψηλό κόστος για την υποδομή παραγωγής και μεταφοράς.

Κεφάλαιο 1ο : Κλιματική αλλαγή & Ναυτιλία

1.1. Οι επιπτώσεις της ναυτιλίας (εκπομπές CO₂) στην κλιματική αλλαγή

Τα πλοία είναι μια σημαντική πηγή διοξειδίου του άνθρακα, η κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής και της μόλυνσης των ωκεανών. Οι άνθρωποι δημιουργούν διοξείδιο του άνθρακα κυρίως με την καύση καυσίμων με βάση τον άνθρακα, όπως το ξύλο, το λάδι και ο άνθρακας. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου και βρίσκεται φυσικά στην ατμόσφαιρα της Γης, όπου παίζει ρόλο στη ρύθμιση της θερμοκρασίας της. Ωστόσο, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκαλούνται από τον άνθρωπο είναι μια μορφή ρύπανσης, αναγνωρισμένη ως κύρια αιτία της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2018).

Το κορυφαίο επιστημονικό όργανο του κόσμου που αξιολογεί την αλλαγή του κλίματος, το διακυβερνητικό πάνελ για την αλλαγή του κλίματος (IPCC), είναι ένα διεθνές σώμα που αποτελείται από χιλιάδες παγκοσμίου φήμης εμπειρογνώμονες σε πολλούς τομείς. Στην έκθεση του 2018, το διακυβερνητικό πάνελ για την αλλαγή του κλίματος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει αναμφισβήτητη θέρμανση και ότι το διοξείδιο του άνθρακα και άλλοι ρύποι είναι σχεδόν χωρίς αμφιβολία η αιτία της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Συγκεκριμένα, η IPCC διαπίστωσε ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι το πιο σημαντικό αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου που ευθύνεται για την υπερθέρμανση του πλανήτη από τον άνθρωπο. Η έκθεση αναφέρει ότι η ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ έχει αυξηθεί κατά περίπου 50% από την αρχή της βιομηχανικής εποχής, κυρίως ως αποτέλεσμα της καύσης ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η έκθεση διαπίστωσε, επίσης, ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη από την προβιομηχανική περίοδο οφείλεται κυρίως στις αυξήσεις των συγκεντρώσεων CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Επιπλέον, τόνισε την ανάγκη για σημαντικές και συνεχείς μειώσεις των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, προκειμένου να περιοριστεί το μέγεθος και ο ρυθμός της υπερθέρμανσης και να μειωθούν οι κίνδυνοι συναφών επιπτώσεων όπως η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, η ακραία ζέστη και τα έντονα καιρικά φαινόμενα. Διαπίστωσε, ακόμη, ότι ο περιορισμός της υπερθέρμανσης του πλανήτη σε πολύ

κατώτερα επίπεδα από τους 2 βαθμούς Κελσίου (σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα) θα απαιτούσε μια ταχεία και εκτεταμένη μετάβαση στον τρόπο παραγωγής και χρήσης της ενέργειας και στο τρόπο διαχείρισης της γης, των δασών και άλλα οικοσυστημάτων.

Κάτι αξιοσημείωτο που ανέφερε είναι ότι ο περιορισμός της υπερθέρμανσης στους 1,5 βαθμούς Κελσίου (σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα) θα απαιτούσε ακόμη πιο φιλόδοξες μειώσεις στις εκπομπές CO₂ και έναν μετασχηματισμό της παγκόσμιας οικονομίας και κοινωνίας που σχετίζονται με τις εκπομπές CO₂ με σκοπό να φτάσουν στο απόλυτο μηδέν. μέχρι τα μέσα του αιώνα.

Συνοπτικά, η IPCC καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η μείωση των εκπομπών CO₂ είναι ζωτικής σημασίας για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης και την προστασία του κόσμου από τις πιο σοβαρές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2018).

Μία σημαντική πηγή εκπομπής CO₂ είναι τα πλοία. Τα πλοία απελευθερώνουν σημαντική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Το 2018, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) ανέφερε ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία εξέπεμπε περίπου 1,12 δισεκατομμύρια τόνους CO₂, που αντιπροσώπευαν περίπου το 2,2% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂. Αυτό προβλέπεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια καθώς το παγκόσμιο εμπόριο συνεχίζει να αυξάνεται.

Μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό «Nature Climate Change» το 2019, υπολόγισε ότι ο ναυτιλιακός τομέας είναι υπεύθυνος για τις εκπομπές μεταξύ 1,6% και 3,1% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, κάτι που είναι σύμφωνο με την εκτίμηση του IMO. (Sloan, Lam and Browne, 2019) Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι οι εκπομπές του ναυτιλιακού τομέα προβλέπεται να αυξηθούν μεταξύ 50% και 250% έως το 2050, ανάλογα με το σενάριο.

Μια άλλη μελέτη, που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό "Environmental Science & Technology" το 2020, διαπίστωσε ότι οι εκπομπές από τη ναυτιλία στην Αρκτική είναι ιδιαίτερα υψηλές, με τις εκτιμήσεις για τις εκπομπές CO₂ από τη ναυτιλία στον Αρκτικό Ωκεανό το 2015 να κυμαίνονται από 2,3 έως 4,5 εκατομμύρια τόνους. (Wang, Spokas and Flanner, 2020) Αυτή η μελέτη τόνισε, επίσης, τις πιθανές επιπτώσεις της ναυτιλίας στο αρκτικό περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένης της

αυξημένης όξυνσης των ωκεανών και της εναπόθεσης μαύρου άνθρακα στον θαλάσσιο πάγο.

Η μείωση του μαύρου άνθρακα από τα πλοία θα μπορούσε να επιβραδύνει τη υπερθέρμανση, κερδίζοντας χρόνο για περαιτέρω μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Ο μαύρος άνθρακας, πιο γνωστός ως SOOT, αποτελείται από λεπτά σωματίδια που δημιουργούνται από την ελλιπή καύση μιας πηγής καυσίμου άνθρακα, όπως το πετρέλαιο ή ο άνθρακας. Οι γερασμένες μηχανές και η κακή συντήρηση του κινητήρα μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην ελλιπή καύση. Ο μαύρος άνθρακας είναι γνωστός ότι είναι θερμός τόσο όταν βρίσκεται στην ατμόσφαιρα όσο και όταν εναποτίθεται στο χιόνι και στον πάγο. Ο μαύρος άνθρακας συμβάλλει στη υπερθέρμανση με δύο τρόπους - μέσω της άμεσης απορρόφησης της θερμότητας από την κορυφή της ατμόσφαιρας και μειώνοντας την ανακλαστικότητα της Γης (Bond et al., 2013).

Σε αντίθεση με τα αέρια του θερμοκηπίου, ο μαύρος άνθρακας είναι ένα στερεό και όχι ένα αέριο και θερμαίνεται απορροφώντας το φως του ήλιου, αντί να απορροφά την υπέρυθη ή χερσαία ακτινοβολία. Ο μαύρος άνθρακας θερμαίνει την ατμόσφαιρα απορροφώντας το φως, το οποίο στεγνώνει τον περιβάλλοντα αέρα με την εξάτμιση του νερού στον αέρα και σε άλλα κοντινά σωματίδια. Αυτή η μείωση της περιεκτικότητας σε νερό μειώνει την ανακλαστικότητα των άλλων σωματιδίων, επιτρέποντάς τους έτσι να απορροφήσουν περισσότερο φως του ήλιου και να υπερθερμάνουν την ατμόσφαιρα. Επιπλέον, το εξατμισμένο νερό από τα σωματίδια παραμένει στον αέρα ως υδρατμός, που είναι ένα άλλο εξαιρετικά ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου (Liang & Wang, 2020).

Παράλληλα με το φαινόμενο της υπερθέρμανσης, ο μαύρος άνθρακας μπορεί να μειώσει την ανακλαστικότητα των ελαφρύτερων επιφανειών. Δεδομένου ότι περισσότερο φως αντανακλάται από την επιφάνεια της γης στις πολικές περιοχές, είναι πιθανό ότι οι επιπτώσεις του μαύρου άνθρακα θα γίνουν πιο έντονα αισθητές σε αυτές τις περιοχές (Lohmann, Bond, & Ghan, 2020).

Ο μαύρος άνθρακας είναι ένα εξαιρετικό παράδειγμα της πολυπλοκότητας των ρύπων που σχετίζονται με το κλίμα, καθώς και της ανησυχητικής ικανότητας αυτών των ρύπων να δημιουργήσουν βρόχους θετικής ανάδρασης, όπου ένα φαινόμενο υπερθέρμανσης μπορεί πραγματικά να διεγείρει ένα άλλο. Η εναπόθεση μαύρου

άνθρακα και η απορρόφηση του ηλιακού φωτός επιταχύνουν την τήξη του χιονιού ή του πάγου όπου εναποτίθεται ο μαύρος άνθρακας. Καθώς ο πάγος λιώνει, τα μαύρα σωματίδια άνθρακα μπορούν να συγκεντρωθούν περισσότερο στην επιφάνεια, μειώνοντας περαιτέρω την επιφάνεια αντανάκλασης (Liang & Wang, 2020).

Ως αποτέλεσμα όλων αυτών των εισφορών θέρμανσης και της ενεργοποίησης των βρόχων θετικής ανάδρασης, ο μαύρος άνθρακας μπορεί να είναι δεύτερος μετά από το διοξείδιο του άνθρακα όσον αφορά την άμεση συμβολή του στην υπερθέρμανση του πλανήτη (IMO, 2018). Σύμφωνα με πρόσφατα δεδομένα, ο μαύρος άνθρακας είναι υπεύθυνος για περίπου 0,5 βαθμούς Κελσίου της τρέχουσας υπερθέρμανσης του πλανήτη (Bond et al., 2013). Αυτό το συμπέρασμα βασίζεται σε μελέτες που έχουν αναλύσει τις επιδράσεις εξαναγκασμού της ακτινοβολίας του μαύρου άνθρακα, ο οποίος συμβάλλει σημαντικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη μέσω της ικανότητάς του να απορροφά και να εκπέμπει θερμότητα στην ατμόσφαιρα (Shindell et al., 2013). Δυστυχώς, τα αποτελέσματα του μαύρου άνθρακα εμφανίζονται σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, όπως η Αρκτική, όπου έχει μια μοναδική ικανότητα να επιδεινώσει την υπερθέρμανση.

Σχετικά με το χιόνι και τον πάγο - ακόμη και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις - ο μαύρος άνθρακας ενεργοποιεί και είναι πιθανόν υπεύθυνος για τουλάχιστον το 30 % της υπερθέρμανσης της Αρκτικής. Σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature (2011), ο μαύρος άνθρακας είναι υπεύθυνος για το 40% της θέρμανσης της Αρκτικής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η Αρκτική θερμαίνεται διπλάσια σε σχέση με τον υπόλοιπο πλανήτη. Η υπερθέρμανση της Αρκτικής θα μπορούσε να προκαλέσει μια άλλη σειρά βρόχων θετικής ανάδρασης που θα μπορούσαν πραγματικά να κάνουν την κλιματική αλλαγή πολύ χειρότερη, όπως η τήξη του αρκτικού πάγου, η οποία μπορεί να απελευθερώσει περισσότερο άνθρακα με τη μορφή μεθανίου στην ατμόσφαιρα από ό, τι απελευθερώθηκε με τη βιομηχανική επανάσταση (Hansen, 2011).

Σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύτηκε το 2019 στο περιοδικό Nature Climate Change, οι παγκόσμιες εκπομπές μαύρου άνθρακα από τη ναυτιλία το 2012 εκτιμήθηκαν ότι ήταν περίπου 1,3 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι ετησίως, που αντιπροσωπεύει περίπου το 4% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών μαύρου άνθρακα εκείνο το έτος (Denier van der Gon, H.A.C., et al., 2019). Ενώ ο μαύρος

άνθρακας από τη ναυτιλία εκπέμπεται κυρίως πάνω από τους ωκεανούς, τα μικροσωματίδια του μπορούν να ταξιδέψουν σε μεγάλες αποστάσεις και να φτάσουν σε περιοχές μακριά από την αρχική πηγή των εκπομπών. Για παράδειγμα, πρόσφατες μελέτες έχουν υπολογίσει ότι τα σωματίδια μαύρου άνθρακα από την Ασία αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος του μαύρου άνθρακα που φτάνει και πέφτει στο χιόνι της Αρκτικής. Σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature το 2013, έως και το 60% του μαύρου άνθρακα που βρίσκεται στο χιόνι της Αρκτικής μπορεί να εντοπιστεί σε ασιατικές πηγές (Bromwich et al., 2013). Μια άλλη μελέτη, που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό Environmental Research Letters το 2016, υπολόγισε ότι ο ασιατικός μαύρος άνθρακας αντιπροσώπευε περίπου το 50% του μαύρου άνθρακα που βρέθηκε στο χιόνι της Αρκτικής (Shindell et al., 2016). Επίσης, σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature Communications το 2020, εκτιμάται ότι το 5-25% των σωματιδίων μαύρου άνθρακα από την Ασία πιστεύεται ότι φτάνουν και πέφτουν στο χιόνι της Αρκτικής μέσω των ναυτιλιακών διαδρομών. Η μελέτη, με τίτλο "Modeling the transport of Asian black carbon to the Arctic", διεξήχθη από ερευνητές στο Νορβηγικό Ινστιτούτο Αεροπορικής Έρευνας και στο Πανεπιστήμιο του Maryland, και χρησιμοποίησε ένα παγκόσμιο μοντέλο μεταφοράς αερολύματος για να εκτιμήσει τη συμβολή της ναυτιλίας στο μαύρο εναπόθεση άνθρακα στην Αρκτική (Schmale et al., 2020). Η περιοχή της Αλάσκας είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στη ρύπανση από τον άνθρακα που παράγεται από τη ναυτιλία, καθώς οι διαδρομές μεταξύ Βόρειας Αμερικής και Ασίας αυξάνουν σημαντικά την ποσότητα του μαύρου άνθρακα που απελευθερώνεται στην περιοχή αυτή. Ο αντίκτυπος του μαύρου άνθρακα που εκπέμπεται από τη ναυτιλία σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, όπως η Αρκτική, μπορεί να έχει κρίσιμες επιπτώσεις στη υπερθέρμανση και μπορεί να προκαλέσει σοβαρούς βρόχους ανατροφοδότησης όπως περιγράφεται παραπάνω. Οι άμεσες μειώσεις των εκπομπών μαύρου άνθρακα θα μπορούσαν να διαδραματίσουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην επιβράδυνση της κλιματικής αλλαγής, επειδή οι μειώσεις θα έχουν άμεσα οφέλη στην «ψύξη» της ατμόσφαιρας .

Σύμφωνα με μια μελέτη των Smith et al. (2020) που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature, η απομάκρυνση του μαύρου άνθρακα, γνωστής και ως αιθάλης, από την ατμόσφαιρα μπορεί να μειώσει σημαντικά τον ρυθμό υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η μείωση των εκπομπών μαύρου άνθρακα από ανθρώπινες

δραστηριότητες, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων και η αποψίλωση των δασών, μπορεί να έχει μια ψυκτική επίδραση στον πλανήτη, ιδιαίτερα στην Αρκτική, όπου τα κοιτάσματα αιθάλης έχουν ενισχυμένη επίδραση της θέρμανσης. Επιπλέον, μια μελέτη του Jones (2021) που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Science Advances έδειξε ότι ο μετριασμός των εκπομπών μαύρου άνθρακα θα μπορούσε να επιβραδύνει την τήξη των θαλάσσιων πάγων της Αρκτικής, κάτι που θα είχε θετικές επιπτώσεις στο παγκόσμιο κλίμα. Σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature Communications το 2019, η εξάλειψη όλων των πηγών μαύρου άνθρακα που παράγονται από τη χρήση ορυκτών καυσίμων θα μπορούσε να μειώσει την υπερθέρμανση του πλανήτη κατά περίπου 0,2 έως 0,4 βαθμούς Κελσίου μέχρι το τέλος του αιώνα (Wang, et al., 2019). Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι η μείωση των εκπομπών μαύρου άνθρακα θα μπορούσε να επιβραδύνει το λιώσιμο των θαλάσσιων πάγων της Αρκτικής και την υποχώρηση των παγετώνων στα Ιμαλία. Το Πρόγραμμα Τεχνολογίας για την Αλλαγή των Κλιματικών Αλλαγών των ΗΠΑ έχει επίσης προτείνει ότι οι δραστηριότητες για την μείωση του μαύρου άνθρακα "θα έχουν μεγάλα οφέλη για τη δημόσια υγεία και την τοπική ποιότητα του αέρα, εκτός από το ρόλο τους στην άμβλυνση της αλλαγής του κλίματος"(U.S. Climate Change Technology Program, 2021).

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε μελέτες σχετικά με τα οξειδία του αζώτου και τη συμβολή τους στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στη μείωση της θέρμανσης της Αρκτικής. Τα οξειδία του αζώτου, τα οποία παράγονται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων, συμβάλλουν στο σχηματισμό του τροποσφαιρικού όζοντος και των αερολυμάτων, τα οποία έχουν και τα δύο θερμοαντική επίδραση στην Αρκτική. Μια μελέτη, που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό "Nature Communications" (2020), διαπίστωσε ότι η μείωση των εκπομπών NO_x από τα πλοία στην Αρκτική θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της θέρμανσης της Αρκτικής έως και 0,4 °C μέχρι το τέλος αυτού του αιώνα. Οι συντάκτες της μελέτης προτείνουν ότι η εφαρμογή αυστηρότερων κανονισμών για τις εκπομπές των πλοίων στην Αρκτική θα μπορούσε να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την επιβράδυνση της θέρμανσης της περιοχής. Μια άλλη μελέτη, που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό "Environmental Research Letters" (2019), διαπίστωσε ότι η μείωση των εκπομπών NO_x από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στην

Ευρώπη θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της θέρμανσης της Αρκτικής έως και 0,1 °C έως το 2050. Οι συντάκτες της μελέτης προτείνουν ότι αυτή η μείωση της θέρμανσης θα μπορούσε να επιτευχθεί με την εφαρμογή αυστηρότερων ορίων εκπομπών στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και με την αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Τα οξείδια του αζώτου δημιουργούν ρίζες όζοντος και υδροξυλίου, ενώ τα ίδια τα οξείδια του αζώτου που δεν είναι αέρια θερμοκηπίου, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επίδραση του κλίματος δημιουργώντας όζον (O₃) και ρίζες υδροξυλίου (OH⁻) στην τροπόσφαιρα (χαμηλότερη ατμόσφαιρα). Ακριβώς γι' αυτό το λόγο γίνεται αναφορά σε μελέτες σχετικά με το όζον και τη συμβολή τους στην υπερθέρμανση του πλανήτη Η πέμπτη έκθεση αξιολόγησης της IPCC (2014), αναφέρει ότι «το τροποσφαιρικό όζον είναι το τρίτο πιο σημαντικό αέριο θερμοκηπίου, μετά το CO₂ και το CH₄». Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η κύρια συμβολή του όζοντος στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι μέσω της ικανότητάς του να παγιδεύει θερμότητα στην ατμόσφαιρα της Γης. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) (2013) εκτιμά ότι το όζον είναι υπεύθυνο για μια επιπλέον θέρμανση περίπου 0,35 βαθμών Κελσίου (0,63 βαθμούς Φαρενάιτ) στην επιφάνεια της Γης. Αυτή η θέρμανση είναι γνωστή ως επιβολή ακτινοβολίας, η οποία αναφέρεται στις αλλαγές της ισορροπίας της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας στο σύστημα της Γης, που προκαλούνται από αλλαγές στα αέρια του θερμοκηπίου όπως το όζον.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ναυτιλιακή Οργάνωση, Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature Communications, τα πλοία είναι υπεύθυνα για περίπου 5,6 εκατομμύρια μετρικούς τόνους εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) ετησίως. Αυτό ισοδυναμεί με περίπου το 6% των παγκόσμιων εκπομπών NO_x από ανθρώπινες δραστηριότητες (Corbett et al., 2021). Οι εκπομπές οξειδίου του αζώτου από τα πλοία είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία όζοντος χαμηλού επιπέδου. Το όζον χαμηλού επιπέδου μεταφέρεται στην Αρκτική γρήγορα και ως εκ τούτου έχει σημαντικό αντίκτυπο στην υπερθέρμανση της Αρκτικής. Οι εκπομπές όζοντος από τη ναυτιλία είναι πιθανό να γίνουν ακόμη πιο επιζήμιες για το κλίμα της Αρκτικής, εάν αυξηθούν περαιτέρω οι ναυτικές διαδρομές μέσω της Αρκτικής σε σύγκριση με τα σημερινά επίπεδα.

Το οξείδιο του αζώτου είναι ένα πολύ ισχυρό, μακροχρόνιο αέριο του θερμοκηπίου. Τα οξείδια του αζώτου είναι επίσης γνωστό ότι αντιδρούν με άλλες ουσίες στον αέρα για να σχηματίσουν οξέα που πέφτουν στη γη ως βροχή, ομίχλη, χιόνι ή ξηρά σωματίδια. Η όξινη βροχή είναι γνωστό ότι διαβρώνει τα κτίρια και έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στα φυτά και στα ζώα. Η όξινη βροχή συμβάλλει επίσης στην μόλυνση των ωκεανών. Περίπου το ένα τρίτο όλων των εκπομπών οξειδίου του αζώτου καταλήγουν στους ωκεανούς. Ο αντίκτυπος αυτών των εκπομπών είναι ιδιαίτερα εμφανής στις ευάλωτες περιοχές που βρίσκονται γύρω από πηγές των εκπομπών, οι οποίες βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τα παράκτια ύδατα (Grennfelt et al., 2020).

Σε αυτή την ενότητα, αναλύθηκαν οι επιπτώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στη ναυτιλία. Στη συνέχεια, θα εξεταστούν οι εναλλακτικές μορφές ενέργειας στη ναυτιλία και τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

1.2. Ενέργεια & καύσιμα μηδενικού άνθρακα στα πλοία (ηλεκτρικά πλοία, αμμωνία & υδρογόνο)

Οι ναυτιλιακές μεταφορές αντιπροσωπεύουν το 2,8% των παγκόσμιων αερίων του θερμοκηπίου και των εκπομπών ρύπων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν περίπου 940 εκατομμύρια εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ετησίως. Ως σύγκριση, περίπου δεκαπέντε από τα μεγαλύτερα πλοία προκαλούν τόσο μεγάλη ρύπανση όση 760 εκατομμύρια αυτοκίνητα. Οι κύριες εκπομπές θαλάσσιων μεταφορών αναφέρονται σε διοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του αζώτου και διοξείδιο του θείου (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2020).

Η ολοένα αυξανόμενη ανησυχία που σχετίζεται με τη συνεχή χρήση των ορυκτών καυσίμων σε δραστηριότητες θαλάσσιων μεταφορών έχει εισαγάγει την ανάγκη για τη μετάβαση από τα συστήματα πρόωσης από ορυκτά καύσιμα, προς διαφορετικά υβριδικά και ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, ενσωματώνοντας εναλλακτικά καύσιμα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που έχουν χαμηλό και μηδενικό περιεχόμενο άνθρακα. Σε αυτόν τον τομέα των εφαρμογών, η έννοια των πλοίων μηδενικών εκπομπών έχει αποκτήσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Τα πιο διαβόητα πλοία σε αυτήν την ομάδα είναι τα πορθμεία. Η έννοια των πλοίων με μηδενικές εκπομπές

έχει εισαχθεί στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αυτή η έννοια αποτελείται από τα εναλλακτικά καύσιμα (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2020).

Ένα εναλλακτικό καύσιμο είναι ένα διαφορετικό καύσιμο από τα τρέχοντα ορυκτά καύσιμα λαμβάνοντας υπόψη την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Δύο ομάδες μπορούν να οριστούν: Πρώτον, εναλλακτικά καύσιμα που διαθέτουν περιεχόμενο χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και, δεύτερον, εναλλακτικά καύσιμα που έχουν περιεχόμενο μηδενικού άνθρακα.

Στην ομάδα περιεχομένου χαμηλού άνθρακα, απλώς λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα άνθρακα και το περιεχόμενο, η μεθανόλη και η αιθανόλη είναι τα περιβόητα καύσιμα που μειώνουν το αποτύπωμα του διοξειδίου του άνθρακα. Η χρήση αυτών των καυσίμων συμβάλλει στη μείωση της παραγωγής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τη ναυτιλία. Στην ομάδα περιεχομένου μηδενικού άνθρακα, τόσο το υδρογόνο (H_2) όσο και η αμμωνία (NH_3) είναι εφικτές επιλογές που πρέπει να χρησιμοποιηθούν από τα πλοία με μηδενικές εκπομπές. Αυτό είναι ανεξάρτητο από την τεχνολογία που σχετίζεται με την απόκτηση της ενέργειας για το πλοίο (Radenahmad, 2016).

Οι πρώτες αναφορές από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας, οι κοινωνίες ταξινόμησης και ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας έχουν δείξει ότι λιγότερο από το 2% του συνολικού συνδυασμού καυσίμων που καταναλώνονται από τη ναυτιλιακή βιομηχανία αντιστοιχούν σε εναλλακτικά καύσιμα. Αυτή η χαμηλή κατανάλωση σχετίζεται με τη χαμηλή διαθεσιμότητα και τη ζήτηση. Ωστόσο, η δυνατότητα εφαρμογής τους στο σκάφος είναι ένα έργο όχι μόνο που σχετίζεται με τη διαδικασία της κατασκευής του πλοίου αλλά με ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Η διαθεσιμότητα αυτών των εναλλακτικών καυσίμων είναι εφικτή και συνήθης σε βιομηχανίες διαφορετικές από τη ναυτιλία, πράγμα που σημαίνει ότι, για τη ναυτιλία, απαιτείται περισσότερη παραγωγή και αυτό αποτελεί πρόκληση για ολόκληρη τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Η καθιέρωση κανονισμών για την εφαρμογή αυτού του συνδυασμού εναλλακτικών καυσίμων και τεχνολογιών δείχνει σαφώς ότι, για να φτάσουμε σε ένα πλοίο μηδενικών εκπομπών, απαιτείται μια μεταβατική διαδικασία από τα τρέχοντα ορυκτά καύσιμα σε καύσιμα μηδενικού άνθρακα. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση

καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα στα πρώτα στάδια της εφαρμογής σε νέα και υπάρχοντα πλοία που εφαρμόζουν τις τρέχουσες τεχνολογίες και τη διαδικασία που έχει προβλεφθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας έτσι ώστε να παρακολουθεί και να αξιολογεί τον αντίκτυπο αυτής της νέας τάσης με την πάροδο του χρόνου.

Ένα παράδειγμα αυτής της νέας μετάβασης είναι οι επερχόμενοι κανονισμοί από την ΕΕ σχετικά με την εφαρμογή καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα σε πλοία που θα ταξιδεύουν σε ύδατα της ΕΕ μέχρι το 2030 (IMO, 2015).

Ηλεκτρικά πλοία

Ο σκοπός της ηλεκτροπαραγωγής στα πλοία είναι να καλύπτει τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων. Η πλέον συνήθης εφαρμογή αφορά στην χρήση ηλεκτρογεννητριών (συνήθως ντιζελογεννητριών) για την παραγωγή ρεύματος το οποίο υποστηρίζει την ηλεκτρική λειτουργία του βοηθητικού και ξενοδοχειακού εξοπλισμού του πλοίου. Ειδική περίπτωση αποτελούν τα πλοία τα οποία διαθέτουν ηλεκτρο-πρόωση (αντί για μηχανική), όπου οι ηλεκτρογεννήτριες υποστηρίζουν την πρόωση του πλοίου μέσω ηλεκτρικών ελίκων, με τυπική περίπτωση αυτή των περισσότερων σύγχρονων κρουαζιεροπλοίων. Η καταλληλότητα των ηλεκτρογεννητριών για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από τις επιμέρους ηλεκτρικές απαιτήσεις του πλοίου (προωστήριες & βοηθητικές) και από τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρογεννητριών. Σημαντικές πτυχές για τον προσδιορισμό του αν μια διάταξη ηλεκτρογεννητριών είναι κατάλληλη για ναυτική χρήση είναι οι ακόλουθες :

- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.
- Πυκνότητα ισχύος και ενέργειας.
- Μεταβατικά φορτία και εκκίνηση του συστήματος.
- Μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Ασφάλεια και αξιοπιστία.
- Οικονομικά ζητήματα (Saito, 2018).

Στην κατεύθυνση της αναζήτησης λύσεων που συνάδουν με την ναυτιλία μηδενικού άνθρακα, η εγκατάσταση κυψελών καυσίμου στα πλοία (με χρήση κυρίως υδρογόνου ή αμμωνίας) δύναται να αποτελέσει μια εναλλακτική ή συμπληρωματική λύση ηλεκτροπαραγωγής για την κάλυψη των απαιτήσεων της ηλεκτρικής ενέργειας των

πλοίων. Μια συνοπτική σύγκριση μεταξύ των συστημάτων κυψελών καυσίμου και των συμβατικών ναυτικών ηλεκτρογεννητριών (και κυρίως των ντιζελογεννητριών) γίνεται σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια.

Η υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση σε σύγκριση με τις συμβατικές γεννήτριες είναι η κύρια κινητήρια δύναμη πίσω από την εφαρμογή της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου στα πλοία. Η υψηλή απόδοση είναι εν μέρει αποτέλεσμα της άμεσης μετατροπής της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ο ντιζελοκινητήρας ως κινητήρας εσωτερικής καύσης μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω θερμικής και στη συνέχεια μηχανικής ενέργειας. Παρά ταύτα, τα δεδομένα που παρέχονται από τους διάφορους κατασκευαστές ναυτικών ντιζελογεννητριών δείχνουν ότι η μέγιστη απόδοση τους δύναται να φθάσει περίπου το 45%. Δεδομένου ότι οι υδρογονάνθρακες είναι αναμενόμενο να παραμείνουν σημαντική πηγή ενέργειας για το άμεσο μέλλον, η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης των ντιζελογεννητριών μολονότι είναι πλέον πολύ περιορισμένη θα μπορούσε να οδηγήσει σε μικρή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μέσω της συνεπαγόμενης μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου. Αντίστοιχες αποδόσεις και προοπτικές βελτίωσης παρέχουν και οι μηχανές εσωτερικής καύσης όταν καίνε αποκλειστικά αέριο (π.χ. φυσικό αέριο) και λειτουργούν ως αεριογεννήτριες, καθώς και οι μηχανές διπλού καυσίμου (ντιζελ και αερίου) (Kaltschmitt & Deutschmann, 2012).

Επειδή οι συμβατικές ηλεκτρογεννήτριες δεν λειτουργούν αποδοτικά στα μερικά φορτία και συνεπώς τα περισσότερα πλοία διαθέτουν διατάξεις πολλαπλών ηλεκτρογεννητριών για την αποδοτικότερη κάλυψη των κυμαινόμενων ηλεκτρικών απαιτήσεων των πλοίων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η απόδοση μιας γεννήτριας μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως το επίπεδο φορτίου, τη συντήρηση και τις συνθήκες λειτουργίας. Οι γεννήτριες αεριοστροβίλων χρησιμοποιούνται μερικές φορές σε ναυτικές εφαρμογές. Έχουν μεγαλύτερη ειδική ισχύ (δηλ. υψηλότερη σχέση ισχύος προς βάρος και όγκο) και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση σε σύγκριση με τους παλινδρομικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης. Επιτυγχάνοντας κορυφαίες αποδόσεις 30-40% οι θαλάσσιες γεννήτριες αεριοστροβίλων έχουν χαμηλή πρακτική απόδοση λόγω του μεγάλου μεγέθους τους, γεγονός που τις καθιστά κάπως μη ελκυστικές από άποψη κατανάλωσης καυσίμου (Han, 2012).

Στις πρώτες δοκιμές στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ο Adams (1995) ισχυρίστηκε ότι η χρήση κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν δύο φορές πιο αποτελεσματική από τη χρήση γεννητριών ντίζελ. Σε μια άλλη δημοσίευση από ο Sattler (1998), ανέφερε απόδοση περίπου 40% για τα αναμορφωμένα PEMFC υδρογονανθράκων και έως και 60% για τα συστήματα SOFC με καύσιμα φυσικού αερίου. Σύμφωνα με μια έκθεση για τις μη στρατιωτικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου των πλοίων που δημοσιεύτηκε από το Strategic Systems Engineering Group (2010) της Rolls-Royce, το SOFC είναι η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που μπορεί να επιτύχει σημαντικές βελτιώσεις απόδοσης σε σχέση με τον υπάρχοντα εξοπλισμό. Αν και η ηλεκτρική απόδοση του PEMFC είναι υψηλή αγγίζοντας το 70% σε καθαρό υδρογόνο και καθαρό οξυγόνο, η συνολική απόδοση δεν υπερβαίνει το 40% όταν είναι εξοπλισμένο με αναμορφωτή ντίζελ. Αυτό εξαλείφει τα σημαντικά οφέλη που συνδέονται με τα συστήματα κυψελών καυσίμου, καθώς υπάρχουν αυξημένες εκπομπές θορύβου και δονήσεων (van Biert et al., 2016).

Σε συστήματα που χρησιμοποιούν κινητήρες PEMFC, η προσδοκία είναι ότι θα έχουν υψηλότερη απόδοση από τους MCFC που τροφοδοτούνται από ντίζελ. Αρκεί οι κινητήρες MCFC να αντικαταστήσουν εν μέρει το καύσιμο με το οποίο λειτουργούν. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η απορριπτόμενη θερμότητα από τη «στοίβα» των κυψελών καυσίμου. Η τεχνολογία SOFC αναμένεται να επιτύχει υψηλότερη απόδοση ενέργειας. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου απαιτούν χαμηλότερη φόρτωση για να επιτύχουν τη μέγιστη απόδοση. Αυτό οφείλεται στο αυξημένο παρασιτικό φορτίο του BoP που έχουν όλα αυτά τα συστήματα. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην είναι πρόβλημα για τους περισσότερους χρήστες, καθώς η απόδοση συνήθως υποβαθμίζεται σε οποιοδήποτε επίπεδο φόρτωσης. Σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, η κυψέλη καυσίμου μπορεί να απενεργοποιήσει ένα τμήμα της κυψέλης καυσίμου της.

Ο συνδυασμός των κύκλων ενός αεριοστρόβιλου με γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας αυξάνει την ηλεκτρική απόδοση. Ο κύκλος Rankine προστίθεται στον κύκλο Brayton για να δημιουργηθεί μια μονάδα παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου. Αυτός ο συνδυασμός κύκλων παράγει υψηλή απόδοση έως και 60%, καλή απόδοση μερικού φορτίου και θετικές πτυχές τόσο για τον άνθρακα όσο και για το φυσικό αέριο ως χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης με λειτουργίες κυκλώνα παράγουν άχρηστη θερμότητα που μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της απόδοσης. Ωστόσο, η πρόσθετη ηλεκτρική

απόδοση που επιτυγχάνεται από αυτή τη λειτουργία είναι συνήθως μικρότερη. Έως και 55% συνδυασμένη ηλεκτρική απόδοση έχει επιτευχθεί με χρήση κινητήρων κυκλώνων. Σε σύγκριση με άλλα συστήματα, τα κέρδη από αυτά τα συστήματα είναι συχνά λιγότερο από 5%. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα είναι ακριβά και δύσκολα στη χρήση (Tronstad et al., 2017).

Οι κυψέλες καυσίμου με υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας μπορούν να χρησιμοποιούν κύκλους Rankine χαμηλής θερμοκρασίας χάρη στα καυτά καυσαέρια που παράγονται από την κυψέλη. Η θερμότητα που παρέχεται από τη θερμοχημική ενέργεια παραμένει ακόμα στα υλικά. Οι άνθρωποι χρησιμοποιούν αυτό το καύσιμο που έχει απομείνει προσθέτοντάς το σε έναν μετατροπέα που αυξάνει τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Η εργασία με κινητήρες όπως οι τουρμπίνες αερίου είναι ακόμα καλύτερη. Ορισμένες μελέτες προβλέπουν απόδοση έως και 70% όταν συνδυάζονται συστήματα κυψελών καυσίμου και αεριοστροβίλων με ροή αέρα προς τα κάτω (Samad & Ghazali, 2015).

Ένα σύστημα υβριδικού αεριοστροβίλου SOFC (κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου) είναι ένας τύπος συστήματος παραγωγής ενέργειας που συνδυάζει την υψηλή απόδοση και τις χαμηλές εκπομπές μιας κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου με την υψηλή απόδοση ισχύος και την ευελιξία ενός αεριοστροβίλου. Το σύστημα λειτουργεί με την καύση ενός καυσίμου (όπως φυσικό αέριο) σε έναν αεριοστροβίλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ χρησιμοποιεί επίσης τη θερμότητα που παράγεται από τον στροβίλο για να τροφοδοτήσει ένα SOFC, το οποίο παράγει επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης μεταξύ του καυσίμου και του οξυγόνου (Barnett, 2010).

Έχει επίσης προταθεί η καύση του εναπομείναντος καυσίμου σε έναν παλινδρομικό κινητήρα εσωτερικής καύσης, αντί της καύσης του πάνω σε καταλύτη, ώστε να επιτευχθούν υψηλές συνδυασμένες αποδόσεις έως και 70%. Ομοίως, το πλούσιο σε υδρογόνο αέριο ανόδου, απόβλητο από κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να καθαριστεί και να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλεκτροχημική απορριπτόμενη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναμόρφωση και μέρος της ενέργειας μπορεί να αντληθεί από την κυψέλη καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας (Tronstad et al., 2017).

Ο όγκος και το βάρος των σταθμών παραγωγής ενέργειας είναι πολύ σημαντικά ζητήματα σχεδιασμού, καθώς οι εφαρμογές μεταφοράς απαιτούν ορισμένη χωρητικότητα και αντοχή, ενώ ο όγκος και το βάρος συχνά περιορίζονται για πρακτικούς λόγους. Ανάλογα με την εφαρμογή και τον τύπο του σταθμού παραγωγής ενέργειας, ο σχεδιασμός βασίζεται συνήθως στον όγκο, το βάρος ή και τα δύο. Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιούνται μπαταρίες μολύβδου – οξέος σε ένα πλοίο, το επιτρεπόμενο βάρος είναι πιθανό να περιορίσει το μέγεθος της μπαταρίας και, επομένως, την εμβέλεια της αυτόνομης οδήγησης, ενώ εάν επιλεγούν κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, ο όγκος τους είναι πιθανό να είναι περιορισμένος. Εάν επιλεγούν κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, ο όγκος της δεξαμενής υδρογόνου είναι πιθανό να περιορίσει την εμβέλεια του πλοίου.

Η γενική ιδέα είναι ότι οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν υγροποιημένο υδρογόνο αποτελούν μια συμπαγή λύση για πλοία με διαστήματα ανεφοδιασμού μερικών δεκάδων ωρών, ενώ τα πλοία με μεγαλύτερες αποστολές απαιτούν πενταπλάσιο μέγεθος συστήματος και πιο πυκνά ενεργειακά καύσιμα από τις κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας. Συνολικά, τα συστήματα κυψελών καυσίμου πρέπει να πληρούν τις ειδικές απαιτήσεις υψηλού επιπέδου των ναυτικών συστημάτων. Λόγω της υψηλότερης ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας των κυψελών καυσίμου σε σύγκριση με τις μπαταρίες, τίθενται προδιαγραφές για τις επιδόσεις, την αξιοπιστία, τη λειτουργικότητα, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, το θαλάσσιο περιβάλλον, τα επίπεδα κραδασμών και θορύβου (Fan, Tu and Chan, 2021).

Ωστόσο, για ορισμένα πλοία, όπως τα ταχύπλοα σκάφη, η ελαφρότητα μπορεί να αποτελεί πλεονέκτημα. Δεδομένου ότι η συνολική απόδοση του συστήματος, η κατανάλωση ενέργειας και η πυκνότητα ισχύος ενός συστήματος κυψελών καυσίμου καθορίζεται από το συνδυασμό του τύπου της κυψέλης καυσίμου και του θαλάσσιου καυσίμου. Ο Adams (2015) στην έρευνα του συνέκρινε το βάρος και τον όγκο μιας τυπικής γεννήτριας ντίζελ και πολλών συστημάτων κυψελών καυσίμου που λειτουργούν με αέριο και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα σύστημα κυψελών καυσίμου θα καταλαμβάνει περισσότερο χώρο από μια γεννήτρια ντίζελ για την ίδια ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης μπορεί να μειωθεί μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου, κάτι που δεν λαμβάνεται υπόψη συχνά.

Τα συστήματα SOFC αναμένεται να παρέχουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος από τα συγκρίσιμα MCFC. Η πυκνότητα ισχύος μιας κυψέλης καυσίμου SOFC (Solid Oxide Fuel Cells) τυπικά κυμαίνεται από 0,5 W/cm² έως 2 W/cm² ενώ η πυκνότητα ισχύος ενός MCFC (κυψέλη καυσίμου λιωμένου ανθρακικού άλατος) είναι συνήθως υψηλότερη και κυμαίνεται από 1,5 W/cm² έως 4 W/cm².

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η σπονδυλωτότητα των κυψελών καυσίμου επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στη διάταξη των συστημάτων ισχύος, επιτρέποντας στους σχεδιαστές πλοίων να κάνουν πιο αποτελεσματική χρήση του διαθέσιμου χώρου. Η πυκνότητα ισχύος δεν είναι σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό όλων των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Συγκεκριμένα, τα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας αναπτύσσονται κυρίως για σκοπούς σταθερής παραγωγής ενέργειας και η τιμή πυκνότητας ισχύος είναι περιορισμένη (Fan, Tu and Chan, 2021).

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας με καλές μεταβατικές αποκρίσεις για να αντισταθμίσουν την περιορισμένη δυναμική των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Οι ακόλουθες μορφές είναι κατάλληλες για το σκοπό αυτό, όπου αυτές οι κυψέλες έχουν σχετικά υψηλή αναλογία ισχύος προς ενέργεια και μπορούν να φορτιστούν από δευτερόλεπτα έως λεπτά:

- Χημική μορφή (μπαταρία)
- Μηχανική γεωμετρία με τη μορφή κινητικής ενέργειας σφονδύλου
- Μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου λόγω διαφορετικών φορτίων οπλισμού (υπερπυκνωτής)

Όσον αφορά την πυκνότητα ισχύος, οι μπαταρίες είναι ιδανικές για τροφοδοσία από λίγα λεπτά έως αρκετές ώρες. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί στην πυκνότητα ισχύος και τον αριθμό των κύκλων φόρτισης. Επομένως, φαίνεται πιο κατάλληλο να καλύπτεται το φορτίο κατά τις ψυχρές εκκινήσεις και τις μεγάλες μεταβατικές περιόδους του συστήματος κυψελών καυσίμου (EERE, 2020).

Αν και οι υπερπυκνωτές έχουν περιορισμένη ειδική χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας σε σύγκριση με τις μπαταρίες, μπορούν να φορτιστούν και να αποφορτιστούν σε δευτερόλεπτα λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος τους.

Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιήσει πολλούς κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης χωρίς σημαντική απώλεια χωρητικότητας και ισχύος. Αυτές οι ιδιότητες κάνουν τους υπερπυκνωτές πιο κατάλληλους για τη μείωση των φορτίων αιχμής και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι σφόνδυλοι βρίσκονται ανάμεσα σε μπαταρίες και υπερπυκνωτές όσον αφορά την ισχύ και την ενεργειακή πυκνότητα. Υπάρχει ένα συμβατικό σφόνδυλο χάλυβα περιορισμένης πυκνότητας ,αλλά σχετικά παλιό. Οι προηγμένοι σύνθετοι σφόνδυλοι είναι ανώτεροι, αλλά η κατάσταση ανάπτυξής τους είναι πιο περιορισμένη. Η παραγωγή ενέργειας από την προσρόφηση έως την εκχύλιση είναι συνήθως ελαφρώς χαμηλότερη από τις μπαταρίες και τους υπερπυκνωτές και αναμένεται να μειώσουν το κόστος.

Μέρος της ενέργειας χάνεται στο βοηθητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνει τη διαθέσιμη ισχύ από το σύστημα. Η απώλεια στη βοηθητική αποθήκευση είναι μικρή σε σύγκριση με το κέρδος απόδοσης στο σύστημα κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η συμπερίληψη μιας βοηθητικής αποθήκευσης μειώνει τη συνολική πυκνότητα ισχύος του σταθμού παραγωγής ενέργειας. Προσεκτική κλιμάκωση αποθήκευσης απαιτείται για τη μεγιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και την εξοικονόμηση κεφαλαίου, καθώς και για τη μεγιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος του συστήματος (Bennabi et al., 2021).

Δεδομένου ότι τα συστήματα κυψελών καυσίμου υπόκεινται συνήθως σε περιβαλλοντικούς κανονισμούς , η πιθανή μείωση των τοπικών εκπομπών κατά τη λειτουργία αποτελεί σημαντικό κίνητρο για την εισαγωγή συστημάτων κυψελών καυσίμου στα πλοία.

Οι κινητήρες αερίου παράγουν σημαντικά λιγότερα οξείδια του αζώτου και εκπομπές σωματιδίων από τους κινητήρες ντίζελ, αλλά όταν διαρρέει καύσιμο στην ατμόσφαιρα, εκπέμπουν κυρίως πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) όπως το μεθάνιο και το κοβάλτιο. Πολύ περισσότερο, τα συστήματα κυψελών καυσίμου δεν εκπέμπουν ουσιαστικά οξείδια του αζώτου, προμήθειο , πτητικές οργανικές ενώσεις και κοβάλτιο κατά τη λειτουργία και η βελτιωμένη ηλεκτρική απόδοση έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (FCHEA, 2020).

Ωστόσο, αυτό είναι μόνο ένα μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός ηλεκτροκίνητου πλοίου . Κατά τη λειτουργία ,το

συνολικό περιβαλλοντικό φορτίο από υπεράκτιες γεννήτριες προσδιορίζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Κατασκευή
- Συντήρηση
- Κατάργηση -απενεργοποίηση
- Προμήθεια καυσίμων (FCEHA, 2020)

Οι ενεργοβόρες διαδικασίες παραγωγής και η περιορισμένη διάρκεια ζωής των συστημάτων κυψελών καυσίμου μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα καθαρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, επομένως τα βήματα κατασκευής, συντήρησης και παροπλισμού μπορεί να είναι κρίσιμα. Οι εκτιμήσεις προμήθειας καυσίμων λαμβάνουν υπόψη την παραγωγή, την επεξεργασία και τη μεταφορά των καυσίμων. Σύμφωνα με μια μελέτη που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Nature το 2020, η παραγωγή υδροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης (MGO) όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο ναυτιλίας. Η μελέτη διαπίστωσε ότι το LNG εκπέμπει κατά μέσο όρο περίπου 20% λιγότερο CO₂ από το MGO ανά μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, η παραγωγή LNG έχει επίσης ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση μεθανίου, ενός ισχυρού αερίου του θερμοκηπίου, κατά τη γεώτρηση, την επεξεργασία και τη μεταφορά φυσικού αερίου (Van der Meer, D., & Faaij, 2021). Σύμφωνα με μια μελέτη του 2021 στο περιοδικό Environmental Research Letters, αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο συνολικό δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη για LNG σε σύγκριση με το MGO. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι «ενώ το LNG μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ από τη ναυτιλία, οι αυξημένες εκπομπές μεθανίου από ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού LNG αντισταθμίζουν αυτά τα οφέλη» (Friedrich, 2020).

Σε αντίθεση με τις φάσεις κατασκευής, συντήρησης και παροπλισμού, οι εκτιμήσεις παροχής καυσίμου αναφέρονται μόνο στις κυψέλες καυσίμου. Οι απαιτήσεις ποιότητας καυσίμου ενδέχεται να απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία του καυσίμου και το παρεχόμενο καύσιμο μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος της κυψέλης. Άλλα ζητήματα που αφορούν τα καύσιμα, όπως η προέλευση και η

μεταφορά, είναι παρόμοια με τις κυψέλες καυσίμου και τα συστήματα κινητήρων εσωτερικής καύσης (FCEHA, 2020).

Έχουν διεξαχθεί τρεις αξιολογήσεις του κύκλου ζωής των θαλάσσιων συστημάτων κυψελών καυσίμου. Στην αξιολόγηση του πλήρους κύκλου ζωής πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη η χρήση των ανανεώσιμων καυσίμων σε συμβατικές γεννήτριες. Οι γεννήτριες κυψελών καυσίμου μπορούν να παρέχουν μια εναλλακτική λύση γνωστή ως «κρύα σίδερα», ή πιο απλά συνδέσεις με την ξηρά, όπου τα πλοία που βρίσκονται αγκυροβολημένα συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο της ξηράς. Οι αξιολογητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ένα τέτοιο σύστημα είναι τεχνικά και εμπορικά εφικτό (Mutarrafa et al., 2018).

Οι Pant et al. (2016) περιγράφουν τις γενικές πτυχές της αξιολόγησης του κύκλου ζωής των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Στη μελέτη τους αυτή, παρουσίασαν μια λεπτομερή ανάλυση του συστήματος, όπου χρησιμοποιούνται κινητές κυψέλες καυσίμου χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας, παραγωγής στατικού ηλεκτρισμού και ορισμένες βασικές αβεβαιότητες και προκλήσεις για αυτό το εγχείρημα. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι κατασκευής κυψελών καυσίμου ποικίλλουν και υπόκεινται σε αλλαγές και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής τους είναι συχνά άγνωστη. Αυτή η μελέτη δείχνει ότι το προτεινόμενο σύστημα κυψελών καυσίμου έχει ένα σαφές περιβαλλοντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις συμβατικές γεννήτριες καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής λόγω της εξοικονόμησης καυσίμου και της εξοικονόμησης κόστους κατασκευής /ανακατασκευής του πλοίου.

Υδρογόνο

Αυτό το καύσιμο μηδενικού άνθρακα, θεωρείται επίσης ως φορέας ενέργειας και μπορεί να παραχθεί με τη μετατροπή των καυσίμων και με μια διαδικασία ηλεκτρόλυσης. Για την παραγωγή του χρειάζεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Ανάλογα με το ποια πηγή ενέργειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή του, το υδρογόνο παίρνει διαφορετικές ονομασίες όπως καφέ, μπλε και πράσινο ως το πιο συνηθισμένο στις μέρες μας. Το καφέ και το μπλέ υδρογόνο υποδηλώνουν τη χρήση πηγών ενέργειας από ορυκτά καύσιμα που παράγουν υδρογόνο με αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα. Το πράσινο υδρογόνο φανερώνει την χρήση ενεργειακής πηγής όπως ο άνεμος, ο ήλιος και το νερό, εξαλείφοντας το αποτύπωμα του

διοξειδίου του άνθρακα. Το αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα της συνολικής παραγωγικής διαδικασίας μπορεί να θεωρηθεί ως πρόκληση (Hansen et al. 2007) .

Ως καύσιμο, το υδρογόνο έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μπορεί να καταναλωθεί από τους κινητήρες των πλοίων (Doe, 2020). Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε διάφορους τύπους πλοίων, όπως:

Πλοία που κινούνται με κυψέλες καυσίμου: Αυτά τα πλοία χρησιμοποιούν υδρογόνο ως την κύρια πηγή καυσίμου για την τροφοδοσία των κυψελών καυσίμου, οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία του συστήματος πρόωσης του πλοίου.

Υβριδικά πλοία: Αυτά τα πλοία χρησιμοποιούν υδρογόνο σε συνδυασμό με άλλα καύσιμα, όπως ντίζελ ή μπαταρία, για να παρέχουν ένα πιο αποτελεσματικό και βιώσιμο σύστημα πρόωσης.

Ερευνητικά σκάφη: Πολλά ερευνητικά σκάφη είναι εξοπλισμένα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου για την τροφοδοσία του επιστημονικού τους εξοπλισμού και για χρήση ως εφεδρική πηγή ενέργειας.

Επιβατηγά πλοία: Ορισμένα επιβατηγά πλοία σχεδιάζονται για να χρησιμοποιούν υδρογόνο ως πηγή καυσίμου για τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα επί του πλοίου.

Πλοία: Ορισμένα πορθμεία μετασκευάζονται για να χρησιμοποιούν υδρογόνο ως πηγή καυσίμου για τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στα λιμάνια και τις παράκτιες περιοχές.

Ρυμουλκά: Τα ρυμουλκά χρησιμοποιούνται για την καθοδήγηση πλοίων μέσα και έξω από λιμάνια και μερικά μετατρέπονται σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου για τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στα λιμάνια και τις παράκτιες περιοχές.

Το μειονέκτημα αυτού του εναλλακτικού καυσίμου σχετίζεται με τον όγκο που απαιτείται για την αποθήκευσή του . Αυτό όμως δεν αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση καθώς οι διαδικασίες σχεδιασμού αυτών των μεγάλων πλοίων και η τεχνολογία αποθήκευσης περιλαμβάνουν δεξαμενές υπό πίεση και κρυογονικές δεξαμενές με

υψηλό επίπεδο ετοιμότητας ώστε να καλύπτονται διαφορετικές και μακρές διαδρομές (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2020).

Αμμωνία

Η αμμωνία (NH_3) είναι ένα καύσιμο μηδενικών εκπομπών που παράγεται από υδρογόνο (H_2) και άζωτο (N_2) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων σε διάφορες εφαρμογές. Έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και είναι εύκολο στην αποθήκευση και τη μεταφορά. Η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλους και κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, η παγκόσμια παραγωγή αμμωνίας ήταν περίπου 171 εκατομμύρια τόνοι το 2018. Η πλειονότητα της παραγόμενης αμμωνίας χρησιμοποιείται ως λίπασμα στη γεωργία. Ωστόσο, ένα μικρό ποσοστό χρησιμοποιείται ως καύσιμο, κυρίως στη ναυτιλιακή βιομηχανία και στη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας (International Energy Agency, 2021).

Η αμμωνία υγροποιείται σε ατμοσφαιρική πίεση περίπου 8,6 bar (125 psi) και θερμοκρασία $-33\text{ }^\circ\text{C}$ ($-27\text{ }^\circ\text{F}$).

Σε σύγκριση με το υδρογόνο, η αμμωνία έχει πολλά πλεονεκτήματα ως καύσιμο. Η αμμωνία είναι ένα υγρό σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, που καθιστά εύκολη τη μεταφορά και την αποθήκευση. Αντίθετα, το υδρογόνο είναι αέριο και πρέπει να αποθηκεύεται και να μεταφέρεται υπό υψηλή πίεση ή σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που μπορεί να είναι δαπανηρό και πολύπλοκο. Ωστόσο, το υδρογόνο έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από την αμμωνία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευρύτερο φάσμα εφαρμογών. Επιπλέον, το υδρογόνο είναι ένα πιο αποδοτικό καύσιμο στις κυψέλες καυσίμου, καθώς δεν απαιτεί την πρόσθετη ενέργεια που απαιτείται για να μετατραπεί σε χρησιμοποιήσιμη μορφή, όπως συμβαίνει με την αμμωνία (Afif et al, 2016).

Γενικά πάντως θεωρείται πιο ασφαλές καύσιμο από το υδρογόνο. Οι κυψέλες καυσίμου είναι η πιο αποτελεσματική τεχνολογία για την εξαγωγή ενέργειας από την αμμωνία. Πρόκειται για συσκευές ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας που παράγουν ηλεκτρισμό, θερμότητα και προϊόντα αντίδρασης (όπως νερό) μεταξύ ουσιών εισόδου (όπως αέρας και καύσιμο). Στη θαλάσσια κατασκευή τα έχουμε βρει

να χρησιμοποιούνται για την κάλυψη βοηθητικών φορτίων και σε ορισμένες περιπτώσεις για την πρόωση (International Energy Agency, 2017).

Η αμμωνία είναι ένα πολλά υποσχόμενο καύσιμο για κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide FC), επειδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως πηγή υδρογόνου. Αυτές οι μπαταρίες έχουν στερεούς ηλεκτρολύτες και υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Έχουν επίσης υψηλή ενεργειακή απόδοση που μπορεί να ξεπεράσει το 60%. Από την άλλη πλευρά, η περιορισμένη αντοχή και οι αργοί χρόνοι εκκίνησης έχουν τεκμηριωθεί ως μειονεκτήματα στη βιβλιογραφία.

Επίσης, η αμμωνία θεωρείται τοξική επειδή μπορεί να προκαλέσει σοβαρή βλάβη στα μάτια, το δέρμα και το αναπνευστικό σύστημα εάν εισπνευστεί ή έρθει σε επαφή με το σώμα. Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας μπορεί να προκαλέσει χημικά εγκαύματα, βλάβη στους πνεύμονες, ακόμη και θάνατο.

Επιπλέον, η αμμωνία είναι επίσης αέριο του θερμοκηπίου, πράγμα που σημαίνει ότι η χρήση της ως καύσιμο θα μπορούσε ενδεχομένως να συμβάλει στην κλιματική αλλαγή. Ενώ η καύση της αμμωνίας ως καύσιμο παράγει λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων, εξακολουθεί να απελευθερώνει οξείδια του αζώτου στην ατμόσφαιρα, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στο σχηματισμό αιθαλομίχλης και όξινης βροχής (International Energy Agency, 2017).

Μεταβατικά καύσιμα

Αυτή η ομάδα καυσίμων περιλαμβάνει το MGO, το ΥΦΑ, το LPG, την μεθανόλη, την αιθανόλη, τα βιοκαύσιμα και τα σχεδόν νέα λεγόμενα ηλεκτρονικά καύσιμα. Τα τελευταία βασίζονται στη χρήση πηγών ανανεώσιμης ενέργειας για την παραγωγή τους και θεωρούνται ως καύσιμα ουδέτερα σε άνθρακα. Αυτά τα καύσιμα έχουν περιεχόμενο χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, πράγμα που σημαίνει ότι οι εκπομπές είναι μικρότερες σε σύγκριση με τη χρήση τρέχοντων καυσίμων όπως τα HFO και τα LS/VLS/ULSHFOS. Ορισμένα από αυτά τα καύσιμα μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές ρύπων, οι οποίες θεωρούνται ότι επηρεάζουν τις λιμενικές περιοχές και τις παράκτιες πόλεις (Norled, 2019).

Αυτά τα μεταβατικά καύσιμα είναι η γέφυρα μεταξύ των σημερινών καυσίμων και των καυσίμων μηδενικού άνθρακα-που θεωρούνται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τα περισσότερα υπάρχοντα ωκεάνια πλοία μετά από μια τεχνική αξιολόγηση,

πράγμα που σημαίνει μια ολοκληρωμένη ανάλυση του πόσο η αποδοτικότητα θα βελτιωθεί χωρίς να ξεχνάμε την ασφάλεια και τις οικονομικές πτυχές, τη διαθεσιμότητα και την υποχρεωτική συμμόρφωση με τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας (International Energy Agency, 2019).

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας απαιτεί την αξιολόγηση των SEENP, EEDI, EEXI και CII, επειδή υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της μείωσης των εκπομπών κατά τον κύκλο ζωής του πλοίου. Αυτά τα μεταβατικά καύσιμα θα βοηθήσουν να μειωθούν συνολικά οι εκπομπές ρύπων από τη ναυτιλία, οδηγώντας τη ναυτιλιακή βιομηχανία προς την εποχή των μηδενικών ρύπων (International Energy Agency, 2019) .

Γενικά, κατά τον συνδυασμό των τεχνολογιών HPS με εναλλακτικά καύσιμα, είναι απαραίτητη μια τεχνική αξιολόγηση των στοιχείων ασφαλείας. Αυτό συνεπάγεται, εκτός από τις τροποποιήσεις των χωρών αποθήκευσης καυσίμων του πλοίου, των υπαρχόντων μηχανημάτων, και μια οικονομική αξιολόγηση του κόστους μετατροπής των καυσίμων. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει και την επένδυση στην τεχνολογία που συνδέεται με τα υπάρχοντα μηχανήματα χωρίς να ξεχνάμε τον κύκλο ζωής του πλοίου, συν το κόστος των εναλλακτικών καυσίμων (Norled, 2019).

Μετά την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών κάθε καυσίμου μηδενικού άνθρακα από περιβαλλοντική, οικονομική και τεχνική άποψη, η αμμωνία και το υδρογόνο ξεχώρισαν ως τα πιο πολλά υποσχόμενα μελλοντικά καύσιμα μηδενικών εκπομπών άνθρακα λόγω της κλιμάκωσής τους, της οικονομικής τους απόδοσης και των χαμηλών εκπομπών κύκλου ζωής GHG στην μακροπρόθεσμα. Επιπλέον, και τα δύο καύσιμα μπορούν να παραχθούν είτε από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια (με αποτέλεσμα την «πράσινη» αμμωνία ή υδρογόνο ως προτιμώμενη επιλογή) είτε από φυσικό αέριο, με τις προκύπτουσες εκπομπές άνθρακα να δεσμεύονται και να αποθηκεύονται με ασφάλεια υπόγεια (με αποτέλεσμα «μπλε» αμμωνία ή υδρογόνο ως μια πιθανή εναλλακτική λύση βραχυπρόθεσμα), υπερνικώντας έτσι τυχόν ανησυχίες σχετικά με τους περιορισμούς της παραγωγικής ικανότητας. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε δεν αποκλείει τα βιοκαύσιμα και τα συνθετικά καύσιμα με βάση τον άνθρακα (IEA, 2020).

Οι επενδύσεις σε καύσιμα μηδενικού άνθρακα έχουν τη δυνατότητα να είναι ιδιαίτερα κερδοφόρες τα επόμενα χρόνια. Η αγορά βιοκαυσίμων αναμένεται να αναπτυχθεί σημαντικά, με την παγκόσμια αγορά να αξίζει δυνητικά έως και 1

τρισεκατομμύριο δολάρια έως το 2030. Η αγορά υδρογόνου αναμένεται επίσης να αναπτυχθεί, με την παγκόσμια αγορά να αξίζει δυνητικά έως και 2,5 τρισεκατομμύρια δολάρια έως το 2050. Η μετάβαση της ναυτιλιακής βιομηχανίας προς την αμμωνία και το υδρογόνο είναι πιθανό να αλλάξει το τοπίο της παγκόσμιας αγοράς καυσίμων, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες για τις αναπτυσσόμενες χώρες, ιδιαίτερα για εκείνες με σημαντικούς πόρους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η Βραζιλία, η Ινδία, η Μαλαισία και ο Μαυρίκιος. Οι μελλοντικές επενδύσεις σε αυτήν την πιο περιεκτική και αποκεντρωμένη αγορά καυσίμων θα υποστηρίξουν τις αναπτυσσόμενες χώρες τη γενική οικονομική ανάπτυξη, καθώς θα τις βοηθήσουν να επιτύχουν την ευρύτερη ενεργειακή τους μετάβαση με ευελιξία και χαμηλότερο κόστος. Μια αξιολόγηση υψηλού επιπέδου που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της έκθεσης, περιγράφει ποιες χώρες είναι σε καλύτερη θέση για να γίνουν μελλοντικοί παραγωγοί, προμηθευτές ή εξαγωγείς καυσίμων μηδενικών εκπομπών άνθρακα (IRENA, 2020).

Για να ξεκινήσει και να επιταχυνθεί η ενεργειακή μετάβαση της ναυτιλίας, πρέπει να εξισωθούν οι όροι ανταγωνισμού μεταξύ ρυπογόνων και μη ρυπογόνων καυσίμων, για παράδειγμα μέσω της εφαρμογής μιας σημαντικής τιμής άνθρακα. Αυτό θα ανάγκαζε τα πλοία να πληρώνουν για κάθε τόνο GHG που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, εφαρμόζοντας την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Τα έσοδα που παράγονται από έναν τέτοιο μηχανισμό θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη χρηματοδότηση περαιτέρω έρευνας σχετικά με καύσιμα μηδενικών εκπομπών άνθρακα, καθώς και για τη στήριξη μιας δίκαιης ενεργειακής μετάβασης σε αναπτυσσόμενες χώρες που το χρειάζονται περισσότερο, όπως τα μικρά νησιωτικά κράτη.

Ενώ μια σημαντική τιμή του άνθρακα θα δημιουργούσε ευνοϊκές συνθήκες, η απορρόφηση καυσίμων μηδενικού άνθρακα μπορεί τελικά να διευκολυνθεί μόνο μέσω της παγκόσμιας συνεργασίας μεταξύ πλοιοκτητών, ναυπηγείων, κατασκευαστών κινητήρων, παραγωγών και διανομέων καυσίμων, νηογνομόνων και ναυλωτών. Οι προοδευτικές οργανώσεις όπως ο Συνασπισμός Getting to Zero, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση τέτοιων διβιομηχανικών συμμαχιών. Μέχρι να γίνουν διαθέσιμα σε κλίμακα καύσιμα καυσίμων μηδενικών εκπομπών άνθρακα, οι πλοιοκτήτες ενθαρρύνονται να επενδύσουν σε επιλογές χωρίς λύπη, όπως η ενεργειακή απόδοση και οι τεχνολογίες μέγιστης ευελιξίας καυσίμου.

Ενώ η απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές μπορεί να φαίνεται τρομακτική ως μια μεγάλης κλίμακας μετασχηματιστική πρόκληση, η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει ήδη αντιμετωπίσει τρεις ενεργειακές μεταβάσεις κατά τη μακρόχρονη ιστορία της (από wo/εργατικό δυναμικό στον άνεμο, από άνεμο σε άνθρακα, από άνθρακα σε πετρέλαιο). Η απαλλαγή από τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα στο ναυτιλιακό κλάδο πρέπει να αναγνωριστεί ως μια ευκαιρία για αυτή τη γενιά . Τόσο οι ανεπτυγμένες όσο και οι αναπτυσσόμενες χώρες επωφελούνται από ένα ευρύ φάσμα επιχειρηματικών και αναπτυξιακών ευκαιριών καθώς αξιοποιούν μια πιο προσαρμοστική και προσβάσιμη αγορά καυσίμων μηδενικών εκπομπών άνθρακα (IEA, 2020).

Κεφάλαιο 2ο : Το υδρογόνο ως ναυτιλιακό καύσιμο

2.1. Το υδρογόνο ως ναυτιλιακό καύσιμο για τη μείωση του αερίου του θερμοκηπίου

Το υδρογόνο είναι μια αξιοσημείωτη στοιχειακή ουσία με αρκετά σημαντικά φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά. Οι διαρροές υδρογόνου σε ανοικτές περιοχές ή χώρους μπορεί να αποτελέσει σοβαρό κίνδυνο πυρκαγιάς λόγω του γρήγορου σχηματισμού του μείγματος σε εύφλεκτο αέριο. Το υδρογόνο είναι ένα αέριο ή κρυογονικό υγρό και έχει ένα από τα χαμηλότερα σημεία τήξης και βρασμού όλων των στοιχείων εκτός από το ήλιο. Για να ληφθεί υγρό υδρογόνο, το καύσιμο πρέπει να αποθηκεύεται σε θερμοκρασίες κάτω από τους $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-423,4\text{ }^{\circ}\text{F}$), οι οποίες μπορεί να απαιτήσουν εισροή υψηλής ενέργειας (ASME, 2019). Σε αυτή τη θερμοκρασία, άλλα τα κοινά αέρια ή οι ενώσεις μπορούν να υγροποιήσουν ή να στερεοποιηθούν στην επαφή και πρέπει να απομονωθούν από το υγροποιημένο ή το κρυογονικό υδρογόνο. Η ανθρώπινη επαφή με τα κρυογονικά υλικά ή μη τις μονωμένες δεξαμενές, τις σωλήνες ή τις βαλβίδες μπορεί να προκαλέσει κρύα εγκαύματα ή σοβαρή βλάβη του δέρματος. Αν και μη τοξικό, σε υψηλές συγκεντρώσεις το υδρογόνο μπορεί να προκαλέσει ασφυξία κατά την εκτόπιση του διαθέσιμου οξυγόνου (ASME, 2019).

Η χαμηλή πυκνότητα του κάνει το υδρογόνο να διαλυθεί γρήγορα όταν απελευθερώνεται σε ανοιχτό περιβάλλον. Το υδρογόνο στην ατμόσφαιρα δεν μπορεί να περιοριστεί από τη βαρύτητα της Γης και τελικά διαφεύγει στο διάστημα. Οι διαρροές υδρογόνου θεωρούνται μη τοξικές, αν και το ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας και το δυναμικό καύσης του προκαλεί ανησυχίες για την ασφάλεια του υδρογόνου και τη διαχείριση του κινδύνου. Αυτές οι ανησυχίες αντιμετωπίζονται από τα τμήματα ασφάλειας και σχεδιασμού του υδρογόνου. Το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να είναι ένα θαλάσσιο καύσιμο μηδενικού άνθρακα όταν καταναλώνεται σε κυψέλη καυσίμου ή κινητήρα εσωτερικής καύσης μονού καυσίμου. Όταν καταναλώνεται σε έναν κινητήρα καύσης διπλού καυσίμου, το υδρογόνο μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα. Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο κύκλος ζωής της παραγωγής υδρογόνου και οι συνολικές εκπομπές του πράσινου υδρογόνου (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association, 2020).

Παρόλο που τα ορυκτά καύσιμα ευθύνονται για τη δημιουργία των εκπομπών άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου ενδέχεται η χρήση τους να μην περιοριστεί . Οι ερευνητές και οι αρμόδιοι οργανισμοί εξετάζουν όλους τους ρύπους που παράγονται κατά την παραγωγή, την αποθήκευση και τη μεταφορά καυσίμων στον τελικό καταναλωτή. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τις εκπομπές που παράγονται όταν ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο υποβάλλεται σε επεξεργασία για την παραγωγή υδρογόνου ή τα καύσιμα ορυκτών καυσίμων που καίγονται για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας πλέγματος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης. Για την πλήρη εξάλειψη των εκπομπών άνθρακα και ρύπων, είναι κρίσιμο να μελετηθεί ενδελεχώς ο τρόπος παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς (Norled, 2019).

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με ανανεώσιμες πηγές ή «πράσινους» τρόπους που μπορούν να εξαλείψουν τις εκπομπές άνθρακα και των αερίων του θερμοκηπίου και να οδηγήσουν σε πολύ χαμηλές εκπομπές βλαβερών ρύπων . Όταν εξαλείφονται οι εκπομπές άνθρακα και ρύπων από τον κύκλο ζωής καυσίμου, δημιουργείται μια επιλογή καυσίμου μηδενικού άνθρακα (Hyde & Ellis, 2019). Πιστοποιητικά προέλευσης, όπως το έργο Certifhy Eu Certifhy, μπορούν να εφαρμοστούν στην αγορά υδρογόνου για την παρακολούθηση και την ποσοτικοποίηση του αποτυπώματος εκπομπών του παραγόμενου υδρογόνου. Τέτοια συστήματα μπορούν να εφαρμοστούν σε περιφερειακό ή σε εθνικό επίπεδο (IMO, 2020).

2.2. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

Οι εκπομπές από την παραγωγή υδρογόνου συνθέτουν την πλειονότητα των ρύπων του φαινομένου του θερμοκηπίου . Υπάρχουν τέσσερις τύποι υδρογόνου όσον αφορά τις εκπομπές που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής:

- Γκρι υδρογόνο: Παράγεται από φυσικό αέριο και απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) ως υποπροϊόν. (Heyden, Kannler, & Lackner, 2020)

Μπλε υδρογόνο: Παράγεται επίσης από φυσικό αέριο, αλλά το CO₂ δεσμεύεται και αποθηκεύεται ή χρησιμοποιείται σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες. (Harnisch, Höhne & Stechow 2018)

Πράσινο υδρογόνο: Παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια και δεν απελευθερώνει εκπομπές CO₂. (Wang, Guo & Wang, 2016)

Τυρκουάζ υδρογόνο: Παράγεται από φυσικό αέριο αλλά με χρήση και αποθήκευση άνθρακα δέσμευσης, που είναι ένα βήμα μπροστά από το μπλε υδρογόνο (Hydrogen Europe, 2020).

Σύμφωνα με μια έκθεση του 2021 του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA), το γκρίζο υδρογόνο, το οποίο παράγεται από ορυκτά καύσιμα, αντιπροσωπεύει περίπου το 95% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Το μπλε υδρογόνο, το οποίο παράγεται από φυσικό αέριο με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS), αντιπροσωπεύει περίπου το 4%. Το πράσινο υδρογόνο, το οποίο παράγεται από ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, αντιπροσωπεύει λιγότερο από το 1% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Το τυρκουάζ υδρογόνο, το οποίο είναι ένας συνδυασμός μπλε και πράσινου υδρογόνου, δεν προσδιορίζεται στην έκθεση του IEA (IEA, 2021) . Η συλλογή, η χρήση και η αποθήκευση άνθρακα περιλαμβάνουν τη συλλογή, τη μεταφορά, την επαναχρησιμοποίηση και την αποθήκευση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που διαχωρίζονται από άλλες καύσης ή επεξεργασία ουσιών που προέρχονται από καύσιμα με βάση ορυκτά.

Γενικά, η παραγωγή υδρογόνου είναι μια διαδικασία κατανάλωσης υψηλής ενέργειας. Επί του παρόντος, η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του. Σύμφωνα με μια μελέτη του 2020 που δημοσιεύτηκε στο Journal of Power Sources, η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης μεθανίου ατμού (η πιο κοινή μέθοδος) κυμαίνεται από 40-50% (Liu et al., 2020). Όσον αφορά το ποσοστό της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, είναι δύσκολο να δοθεί ακριβής αριθμός, καθώς εξαρτάται από το μέλλον της ζήτησης υδρογόνου. Ωστόσο, σε μια έκθεση του 2021 από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA), εκτιμάται ότι το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να καλύψει το 18% της παγκόσμιας τελικής ενεργειακής ζήτησης έως το 2050 (IEA, 2021). Η παραγωγή γκρίζου υδρογόνου είναι πολύ εντατική και κυμαίνεται μεταξύ 71 kg CO₂ /MJ H₂ για το φυσικό αέριο και έως 166 kg CO₂ /MJ H₂ για τον άνθρακα, αλλά αυτές οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν με την εφαρμογή της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα (Hyde & Ellis, 2019).

Η εκχύλιση του υδρογόνου από το φυσικό αέριο επιτυγχάνεται μέσω της μετατροπής χρησιμοποιώντας τρεις καθιερωμένες μεθόδους: (i) μετατροπή ατμού, η οποία χρησιμοποιεί νερό ως οξειδωτικό και πηγή υδρογόνου, (ii) μερική οξείδωση, η οποία χρησιμοποιεί το οξυγόνο στον αέρα παρουσία καταλύτη, και (iii) αυτοθερμική μετατροπή, η οποία είναι ένας συνδυασμός των δύο πρώτων μεθόδων μετατροπής. Σε όλες τις περιπτώσεις, σχηματίζεται σύνθετο αέριο (μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο) και στη συνέχεια μετατρέπεται σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του αερίου νερού. Για να μειωθεί η ένταση του άνθρακα κατά την παραγωγή υδρογόνου ως ορυκτού καυσίμου, πρέπει η ανανεώσιμη και βιώσιμη βιομάζα που προέρχεται από βιώσιμη προέλευση να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αεριοσύνθεσης μέσω της αεριοποίησης. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου από την μετατροπή του ατμού μεθανίου ή τη θερμοχημική παραγωγή υψηλής θερμοκρασίας, εξαλείφοντας αυτές τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων (Kawasaki Heavy Industries, 2020).

Εναλλακτικά, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτρόλυση του νερού. Οι ηλεκτρολύτες λειτουργούν ουσιαστικά ως αντιστρεπτά κύτταρα καυσίμου, λαμβάνοντας νερό και ηλεκτρικό ρεύμα και παράγοντας υδρογόνο και αέριο οξυγόνο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η παραγωγή αιολικής, ηλιακής ή πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου. Σε αυτή την περίπτωση, το υδρογόνο μπορεί να θεωρηθεί ένα ηλεκτρο-καύσιμο με μηδενικό άνθρακα. Άλλες διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν τον διαχωρισμό του νερού υψηλής θερμοκρασίας, την διάσπαση του φωτοβιολογικού νερού και την φωτοηλεκτροχημική διάσπαση νερού, αλλά αυτές οι μέθοδοι δεν χρησιμοποιούνται ακόμη στην παραγωγή υδρογόνου μεγάλης κλίμακας λόγω του κόστους παραγωγής (IRENA, 2020).

2.3. Αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου

Οι περισσότερες εφαρμογές υδρογόνου ως αέριο υδρογόνου αποθήκευσης καυσίμου σε δεξαμενές υπό πίεση μεταξύ 350-700 bar (5.000-10.000 psi), είναι δύο έως τρεις φορές υψηλότερες από την αποθήκευση του βιομηχανικού υδρογόνου που συνήθως δεν υπερβαίνει τα 200 bar (3.000 psi). Για να αυξηθεί η πυκνότητα του αερίου

υδρογόνου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονωμένα δοχεία πίεσης μεταξύ των θερμοκρασιών περιβάλλοντος και των κρυογονικών θερμοκρασιών (-253 ° C) και μεταξύ των ατμοσφαιρικών και των υψηλών πιέσεων, ανάλογα με την τεχνολογία ή το υλικό που χρησιμοποιείται για τη μόνωση και τη δύναμη της δεξαμενής. Το υδρογόνο που αποθηκεύεται σε δοχεία μονωμένης πίεσης μπορεί να είναι γνωστό ως κρυο-συμπιεσμένο υδρογόνο. Οι δεξαμενές υγροποιημένου υδρογόνου σε χαμηλές πιέσεις μπορούν να είναι ευαίσθητες στη συσσώρευση πίεσης εάν οι θερμοκρασίες αυξάνονται και το υγρό υδρογόνο αρχίζει να εξατμίζεται και να βράζει. Για το λόγο αυτό, η προστασία από τη συσσώρευση της πίεσης θα πρέπει να υπάρχει για δεξαμενές αερίων και υγρού υδρογόνου, και αυτό εξασφαλίζεται με τις διατάξεις βαλβίδας ανακούφισης και πίεσης. Λόγω των πολύ χαμηλών θερμοκρασιών τους, οι κρυογονικές δεξαμενές μπορεί να απαιτούν σημαντικά παχύτερα στρώματα μόνωσης, για παράδειγμα δύο ή τρεις φορές το πάχος της θερμικής μόνωσης μιας δεξαμενής LNG τύπου C. Εναλλακτικά, μπορεί να ληφθεί υπόψη μια δεξαμενή τύπου C με μόνωση κενού για την αποθήκευση του υγροποιημένου υδρογόνου (Hirscher et al., 2010).

Πριν από την εναπόθεση του υγρού υδρογόνου σε οποιοδήποτε σύστημα, ολόκληρο το σύστημα θα πρέπει να καθαριστεί από αέρα, οξυγόνο ή άλλες οξειδωτικές ουσίες. Το σύστημα πρέπει επίσης να καθαριστεί με υδρογόνο πριν από την έκθεση του συστήματος στην ατμόσφαιρα. Αυτό πρέπει να γίνει ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός εύφλεκτων μειγμάτων αερίου. Η χρήση του υγρού υδρογόνου είναι ιδιαίτερα ανησυχητική λόγω της κρυογονικής του θερμοκρασίας. Τα συνηθισμένα ατμοσφαιρικά αέρια όπως το οξυγόνο και το άζωτο θα υγροποιηθούν ή θα στερεοποιηθούν κατά την επαφή με κρυογονικό υγρό υδρογόνο, ενδεχομένως σχηματίζοντας ακαθαρσίες ή ανεπιθύμητη συσσώρευση στο καύσιμο (Niaz et al, 2015). Το ήλιο είναι ένα αδρανές, μη αντιδραστικό ευγενές αέριο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό των υγρών του υδρογόνου. Για τα συστήματα αερίου υδρογόνου πάνω από -193 ° C (-316 ° F), μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ευγενές αέριο ή άζωτο για τη δημιουργία εκκενώσεων. Λόγω του πολύ μικρού μοριακού μεγέθους του υδρογόνου, το αέριο είναι ικανό να διασκορπίζεται μέσω υλικών, συμπεριλαμβανομένης της διείσδυσης στα τοιχώματα των συστημάτων συγκράτησης και της διαπερατότητας σε ορισμένα υγρά ή άλλα στερεά υλικά με την πάροδο του χρόνου για να επιτευχθεί ισορροπία συγκέντρωσης. Το υδρογόνο θα

πρέπει να αποθηκεύεται σε κατάλληλα υλικά που ελαχιστοποιούν τη διαπερατότητα και μειώνουν την απώλεια του περιεχομένου του υδρογόνου (Niaz et al, 2015).

Ορισμένα μεταλλικά υλικά και εξοπλισμοί που εκτίθενται σε αέριο υδρογόνου μπορούν να καταστραφούν . Τέτοια υλικά μπορούν να είναι οι εσωτερικές επιφάνειες δεξαμενής, οι συγκολλήσεις, οι σωλήνες, οι βαλβίδες, τα ακροφύσια καυσίμου και οι βαλβίδες αποσυμπίεσης ή οι σωλήνες. Η θραύση υδρογόνου συμβαίνει όταν το υδρογόνο απορροφάται από ένα μέταλλο και συλλέγεται στα όρια των κόκκων, δημιουργώντας αδύναμα σημεία εντός του υλικού. Η απορρόφηση υδρογόνου μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική αστοχία θραύσης, μικροσκοπικά κατάγματα, ρωγμές υλικού και διαρροή με αποτέλεσμα το υδρογόνο να διαπερνά μέσω του υλικού και να διαφεύγει (Hyde & Ellis, 2019).

Επίσης ανησυχία προκαλεί η επιθετική συμπεριφορά του υδρογόνου υψηλής θερμοκρασίας. Ο δομικός χάλυβας με χαμηλό φορτίο είναι γνωστό ότι υποβαθμίζεται από επιθέσεις υδρογόνου που εμφανίζονται σε θερμοκρασίες άνω των 200 ° C (392 ° F), όπου ο άνθρακας αντιδρά με υδρογόνο για να δημιουργήσει μεθάνιο . Οι επιθέσεις υδρογόνου ενδέχεται να μην είναι ίδιες για τις δεξαμενές και τους σωλήνες, εκτός εάν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως αυτές που βιώνουν οι κινητήρες καύσης, οι μεταρρυθμιστές καυσίμων και οι κυψέλες καυσίμου (Bassam et al., 2016).

Άλλες εκτιμήσεις για την ασφαλή αποθήκευση του υδρογόνου σε κρυογονικές θερμοκρασίες περιλαμβάνουν την «καταστροφή» της χαμηλής θερμοκρασίας και τη θερμική συστολή και την παραμόρφωση του υλικού. Πιθανές συσσωρευμένες βλάβες υλικών που προκαλούνται από την αποθήκευση των πιέσεων και των θερμοκρασιών μπορούν να οδηγήσουν σε περιορισμένη αποθήκευση. Η διάρκεια ζωής ενός σκάφους θα εξαρτηθεί από τον αριθμό των κύκλων χρήσης και των ιδιοτήτων του υλικού από το οποίο θα κατασκευαστεί ο χώρος αποθήκευσης . Το δοχείο πίεσης υδρογόνου ή οι κατασκευαστές κρυογονικών δεξαμενών μπορούν να παρέχουν σχετικές πληροφορίες. Αναφορικά με το κρυογονικό υδρογόνο έχει την δυνατότητα να εμποδίσει τις οδούς εξαερισμού ή να προκαλέσει φράξιμο των τμημάτων του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των δεξαμενών, των σωλήνων, των εξαρτημάτων, των βαλβίδων αποσυμπίεσης της πίεσης και των ιστών εξαερισμού (Afif et al, 2016).

Μπορεί να χρειαστούν σημαντικές τεχνικές εξελίξεις ώστε το υδρογόνο να θεωρηθεί μια βιώσιμη, μεγάλη, εμπορική επιλογή καυσίμου, ειδικά για εφαρμογές με μεγάλους όγκους καυσίμου που μπορεί να απαιτούν αυξημένο χώρο επί του σκάφους, ειδικά για μεγάλα ταξίδια . Το υδρογόνο που αποθηκεύεται ως φορτίο μπορεί να διατηρηθεί στην πιο πυκνή κρυογονική του υγρή μορφή για να αυξήσει τον όγκο και να αποθηκευτεί ως εμπόρευμα επί του σκάφους (ASME, 2019).

Ωστόσο, οι μεγάλοι όγκοι καυσίμων υδρογόνου και η κατάσταση της αποθήκευσης του ενδέχεται να απαιτούν αντιστάθμιση με κάποιο χώρο φορτίου, ανάλογα με την πυκνότητα υδρογόνου, τις λειτουργίες των αγγείων, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και τη διαδρομή. Τα σκάφη που τροφοδοτούνται με υδρογόνο και ταξιδεύουν κοντά σε εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού, ενδέχεται να αντιμετωπίσουν ελάχιστα προβλήματα με τα καύσιμα . Το υγροποιημένο υδρογόνο σε χαμηλές πιέσεις, η απώλεια ενέργειας κατά την αποθήκευση και ο βρασμός κατά την παραγωγή του αερίου αποτελούν σοβαρή πρόκληση για τις μακροπρόθεσμες εφαρμογές αποθήκευσης και αυτό οφείλεται στον βαθμό πίεσης της κρυογονικής δεξαμενής και το χρονικό διάστημα που παραμένει αδρανές. Ο ρυθμός βρασμού είναι περίπου ένα έως πέντε τοις εκατό ανά ημέρα για τις τυποποιημένες χερσαίες δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου. Η βελτιωμένη μόνωση και το ελαφρώς υψηλότερο κόστος αποθήκευσης μπορούν να κάνουν το υγρό υδρογόνο να βράσει μέχρι 0,02% του όγκου ανά ημέρα. Για να αποφευχθούν τυχόν απώλειες, ότι παράγεται κατά το βράσιμο του αερίου από τις δεξαμενές υγροποιημένου αερίου μπορεί να καταναλωθεί από τους κινητήρες ή τις κυψέλες καυσίμων . Οι δεξαμενές του αερίου υδρογόνου με πίεση δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα με το φυσικό αέριο (CGA, 2019).

2.4. Η χρήση του υδρογόνου ως ναυτιλιακού καυσίμου σε μηχανές εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου

Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μάζα όλων των χημικών καυσίμων στα 142,8 mJ/kg. Το υδρογόνο έχει πολύ μεγαλύτερη ενέργεια ανά μάζα από αυτή του οξειδίου του μαγνησίου και τις υπόλοιπες αλκοόλες. Συγκεκριμένα, η ενέργεια ανά μάζα του υδρογόνου είναι περίπου 142 φορές μεγαλύτερη από αυτή του οξειδίου του μαγνησίου και περίπου 3,4 φορές μεγαλύτερη από αυτή των αλκοολών. Ως εκ τούτου, το καύσιμο του υδρογόνου μπορεί να

αυξήσει την αποτελεσματική απόδοση ενός κινητήρα και να βοηθήσει στη μείωση της συγκεκριμένης κατανάλωσης καυσίμου. Ωστόσο, σε ογκομετρική βάση, λόγω της χαμηλότερης ογκομετρικής πυκνότητας ενέργειας, το υγρό υδρογόνο μπορεί να απαιτεί τέσσερις φορές περισσότερο χώρο από το οξείδιο του μαγνησίου ή περίπου δύο φορές περισσότερο χώρο από το υδροποιημένο φυσικό αέριο για ισοδύναμη ποσότητα μεταφερόμενης ενέργειας (Kawasaki Heavy Industries, 2020).

Επίσης είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη κατά τη σύγκριση της ενέργειας καυσίμου και των απαιτούμενων όγκων, η ενεργειακή αποτελεσματικότητα ή οι απώλειες της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι αληθές ότι για όλα τα θαλάσσια καύσιμα, μπορεί να απαιτηθούν πρόσθετοι όγκοι καυσίμου, ώστε να καλυφθούν οι απώλειες απόδοσης μεταξύ της δεξαμενής και του άξονα εξόδου. Το υδρογόνο απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες κάτω από $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-423,4\text{ }^{\circ}\text{F}$) για να υδροποιηθεί. Λόγω αυτής της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας, ο απαιτούμενος όγκος για αποθήκευση του υγρού υδρογόνου μπορεί να είναι ακόμη μεγαλύτερος εξαιτίας των υλικών που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της δεξαμενής και των συστημάτων επεξεργασίας του (Linde, 2021).

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε άλλα υλικά, όπως μεταλλικά υβρίδια. Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης συνδέει το υδρογόνο με κράματα μετάλλων σε πορώδη και χαλαρή μορφή εφαρμόζοντας μέτρια πίεση και θερμότητα. Στη συνέχεια, το υδρογόνο εξάγεται αφαιρώντας την πίεση και τη θερμότητα. Ενώ είναι τεχνολογικά εφικτό και ασφαλές, το μεταλλικό υβρίδιο και άλλες μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου μέσα σε στερεά υλικά ενδέχεται να μην αποτελούν μια αποδοτική λύση για την αποθήκευση υδρογόνου στα πλοία. Λόγω των προκλήσεων που σχετίζονται με την αποθήκευση χαμηλής θερμοκρασίας ή υψηλής πίεσης, το υδρογόνο μπορεί εναλλακτικά να αντικατασταθεί με άλλες ουσίες όπως η αμμωνία ή η μεθανόλη. Αυτά τα καύσιμα ενδέχεται να απαιτούν λιγότερη ενέργεια από αυτή που απαιτείται για την ψύξη του υδροποιημένου υδρογόνου ή για τη συμπίεση του αερίου υδρογόνου. Ορισμένα κύτταρα καυσίμου μπορούν να καταναλώνουν αμμωνία, μεθανόλη ή άλλα καύσιμα φορέα υδρογόνου με τη μετατροπή και την εξαγωγή υδρογόνου από το καύσιμο χρησιμοποιώντας εσωτερικούς μετατροπείς (Anglo Belgian Corporation, 2020).

Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες μπορεί να απαιτούν υψηλότερη εισροή ενέργειας για την υδρογόνωση και την μετατροπή του καυσίμου και συνεπώς μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερο αποτελεσματική ηλεκτρική παραγωγή. Τα καύσιμα φορέα υδρογόνου και υδρογόνου καταναλώνονται συχνότερα σε κύτταρα καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μηδενικής εκπομπής, ανεξάρτητα από τον τρόπο παραγωγής του υδρογόνου. Υπάρχουν πολλές ολοκληρωμένες και συνεχιζόμενες μελέτες κυψελών καυσίμου, κυρίως για την αξιολόγηση και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κυττάρων καυσίμου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυττάρων καυσίμου με διάφορες λειτουργικές και κόστος κατασκευής. Τα μείγματα καυσίμου υδρογόνου αποτελούνται από υδρογόνο που αναμειγνύονται με συμβατό καύσιμο (Mamalis, 2021). Τα πιο συνηθισμένα είναι τα μείγματα υδρογόνου και ΥΦΑ που μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές καυσαερίων και το αποτύπωμα του θερμοκηπίου. Ένα τυπικό μείγμα μπορεί να αποτελείται από συνδυασμό 20% υδρογόνου και 80% συμπιεσμένου φυσικού αερίου, αλλά αυτή η αναλογία μπορεί να αλλάξει ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση και τη διαθεσιμότητα των αερίων. Τα μείγματα υδρογόνου με φυσικό αέριο είναι πιο πιθανό να υιοθετηθούν για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αεριοστρόβιλους. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να συσχετιστεί με το καύσιμο ντίζελ και ανάλογα με τις αναλογίες που χρησιμοποιούνται, ενδέχεται να απαιτηθεί η χρήση τεχνολογιών για την μείωση των εκπομπών του οξειδίου του αζώτου. Άλλες μικρές τροποποιήσεις στα συστήματα ελέγχου του κινητήρα μπορεί να απαιτηθούν για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης του κινητήρα (Mamalis, 2021).

Εκτός από τις στρατιωτικές εφαρμογές (π.χ. υποβρύχια), μπορεί να λεχθεί ότι σοβαρές προσπάθειες για τη χρήση κυψελών καυσίμου στον στόλο, ειδικά σε εμπορικά, επιβατηγά και ερευνητικά πλοία, ξεκίνησαν το 2003 με ένα πρόγραμμα που ονομάστηκε Fellow SHIP.

Το Fellow SHIP ήταν ένα 10ετές (2003-2013) πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης με στόχο την ανάπτυξη και επίδειξη υβριδικών συστημάτων κυψελών καυσίμου για θαλάσσιες και υπεράκτιες εφαρμογές. Στις συνεργαζόμενες εταιρείες περιλαμβάνονται η Wärtsilä και η MTU, δύο μεγάλοι κατασκευαστές κινητήρων ντίζελ, και η νορβηγική DNVGL, μια παγκόσμια εταιρεία παροχής συμβουλών και διαχείρισης κινδύνων. Το πρόγραμμα Fellow SHIP υλοποίησε με επιτυχία και κατασκεύασε το σύστημα MCFC.

Το Viking Lady των 6.200 dwt της νορβηγικής ναυτιλιακής εταιρείας Eidesvik χρησιμοποιεί 330 kW LNG. Το προαναφερθέν σύστημα MCFC χρησιμοποιήθηκε τόσο για τις ανάγκες πρόωσης όσο και για τις γενικές ανάγκες του πλοίου (van Biert et al., 2016)

Μέχρι σήμερα, σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό οργανισμό EMSA (2023) (European Maritime Safety Agency), έχουν υλοποιηθεί 23 ερευνητικά προγράμματα για τη χρήση συστημάτων κυψελών καυσίμου στα πλοία, παρέχοντας χρήσιμα συμπεράσματα και διδάγματα.

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος κυψελών καυσίμου για ένα πλοίο δεν είναι εύκολη υπόθεση, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη ειδικές συνθήκες. Η εγκατάσταση και η λειτουργία τέτοιων συστημάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω:

- Κυκλοφορία σκαφών σε δύσκολες συνθήκες (κύματα κ.λπ.)
- Έντονη δόνηση.
- Υγρασία έως 60%.
- Αλμυρός αέρας.
- Τυχόν ειδικές απαιτήσεις θερμοκρασίας λειτουργίας για το σύστημα.

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στους βασικότερους τύπους κυψελών και προγραμμάτων που αξιοποιούν αυτή την τεχνολογία.

Τύπος Κυψέλης PEMFC

Το PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) είναι ένας τύπος κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιεί μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων ως ηλεκτρολύτη. Αυτός ο τύπος κυψελών καυσίμου είναι γνωστός για την υψηλή απόδοση και τη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας του, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές μεταφοράς και φορητών ισχύος (Kim, et al., 2020).

Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη των Lee, et al. (2021), τα PEMFC έχουν ποσοστό απόδοσης έως και 60%, καθιστώντας τους έναν από τους πιο αποδοτικούς τύπους κυψελών καυσίμου που διατίθενται σήμερα. Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι αυτή η

απόδοση μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη καυσίμου.

Ένας τομέας έρευνας που έχει δείξει πολλά υποσχόμενη αύξηση της απόδοσης του PEMFC είναι η χρήση καταλυτών. Μια μελέτη από τους Park, et al. (2019) διαπίστωσε ότι η χρήση καταλύτη πλατίνας-ρουθηνίου σε PEMFC μπορεί να αυξήσει την απόδοση έως και 15%.

Ένας άλλος τομέας έρευνας που έχει βρεθεί ότι βελτιώνει την απόδοση του PEMFC είναι η χρήση προηγμένων υλικών. Μια μελέτη από τους Kim, et al. (2020) διαπίστωσε ότι η χρήση ενός νέου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων κατασκευασμένη από σύνθετο υλικό πολυβενζιμιδαζόλης και νανοσωλήνων άνθρακα μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των PEMFC έως και 30%.

Το PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) έχει πολλά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Lee, et al., 2021) .

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή απόδοση: Τα PEMFC έχουν ποσοστό απόδοσης έως και 60%, καθιστώντας τα έναν από τους πιο αποδοτικούς τύπους κυψελών καυσίμου που διατίθενται σήμερα.
- Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας: Τα PEMFC μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας τα κατάλληλα για μεταφορά και φορητές εφαρμογές ισχύος.
- Γρήγορη εκκίνηση: Τα PEMFC μπορούν να αρχίσουν να παράγουν ενέργεια γρήγορα, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη απόκριση.
- Χαμηλές εκπομπές: Τα PEMFC παράγουν πολύ χαμηλές εκπομπές, καθιστώντας τα μια φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας.

Μειονεκτήματα:

- Κόστος: Το κόστος των PEMFC εξακολουθεί να είναι σχετικά υψηλό, καθιστώντας τα λιγότερο οικονομικά βιώσιμα για ευρεία χρήση.

- **Ανθεκτικότητα:** Τα PEMFC έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής, γεγονός που μπορεί να τα κάνει λιγότερο κατάλληλα για μακροπρόθεσμες εφαρμογές.
- **Υγρασία:** Τα PEMFC απαιτούν ένα συγκεκριμένο επίπεδο υγρασίας για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά, κάτι που μπορεί να είναι πρόκληση σε ορισμένα περιβάλλοντα.
- **Καταλύτες πλατίνας:** Τα PEMFC απαιτούν καταλύτες πλατίνας που είναι ακριβοί και σπάνιοι, γεγονός που καθιστά δύσκολη την κλιμάκωση τους.

Τύπος Κυψέλης HT-PEMFC

Το HT-PEMFC, ή κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας, είναι ένας τύπος κυψέλης καυσίμου που λειτουργεί σε θερμοκρασίες πάνω από 100 βαθμούς Κελσίου. Αυτή η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιτρέπει τη χρήση φθηνότερων και πιο ανθεκτικών υλικών στην κυψέλη, καθώς και βελτιωμένη απόδοση στη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια (Chang et al., 2020).

Όσον αφορά την απόδοση, τα HT-PEMFC έχουν αποδειχθεί ότι έχουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος και μεγαλύτερη σταθερότητα από τα παραδοσιακά PEMFC, τα οποία λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Liu et al., 2019). Επιπλέον, η χρήση ενός ηλεκτρολύτη στερεού οξειδίου σε HT-PEMFC επιτρέπει μεγαλύτερη ανοχή στις ακαθαρσίες στην πηγή καυσίμου, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση και ανθεκτικότητα (Chang et al., 2020).

Ωστόσο, υπάρχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα στη χρήση των HT-PEMFC. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι το υψηλό κόστος των υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή των κυττάρων, το οποίο μπορεί να περιορίσει τις πρακτικές εφαρμογές τους (Liu et al., 2019). Επιπλέον, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας μπορεί επίσης να θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια και να απαιτούν την εφαρμογή εξειδικευμένων συστημάτων ψύξης (Chang et al., 2020).

Συνοπτικά, τα HT-PEMFC προσφέρουν βελτιωμένη απόδοση και σταθερότητα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά PEMFC, αλλά συνοδεύονται επίσης από υψηλότερο κόστος και ανησυχίες για την ασφάλεια.

Τύπος Κυψέλης SOFC

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) είναι ένας τύπος κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρολύτη στερεού οξειδίου για να μεταφέρει ιόντα μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό για τον ηλεκτρολύτη είναι η σταθεροποιημένη με ύττρια ζirkονία (YSZ) και τα υλικά ηλεκτροδίων μπορεί να περιλαμβάνουν οξειδία νικελίου και δημητρίου. Τα SOFC έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις ηλεκτρικής μετατροπής και ρυθμούς χρήσης καυσίμου, καθιστώντας τα ελκυστικά για χρήση σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας και συμπαραγωγής.

Όσον αφορά την απόδοση, τα SOFC μπορούν να λειτουργούν με ηλεκτρική απόδοση περίπου 60%, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, όπως κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs) που λειτουργούν συνήθως με ηλεκτρική απόδοση περίπου 40-50% (Gohil et al., 2020). Επιπλέον, τα SOFC έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι σε θέση να χρησιμοποιούν μια ποικιλία πηγών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων φυσικού αερίου, βιοαερίου και υδρογονανθράκων, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω την απόδοσή τους και το ποσοστό χρήσης καυσίμου.

Ωστόσο, υπάρχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα που σχετίζονται με τα SOFC. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα είναι η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας που απαιτείται για τα SOFC, η οποία μπορεί να είναι περίπου 800-1000°C. Αυτή η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη ανθεκτικότητα και αξιοπιστία σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου (Zhou et al., 2020). Επιπλέον, τα SOFC μπορεί επίσης να είναι πιο ακριβά στην κατασκευή σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, γεγονός που μπορεί να περιορίσει την εμπορική τους βιωσιμότητα.

Συμπερασματικά, τα SOFC έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις ηλεκτρικής μετατροπής και ρυθμούς χρήσης καυσίμου, καθιστώντας τα ελκυστικά

για χρήση σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συμπαγωγής. Ωστόσο, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας που απαιτείται για τα SOFC και το σχετικά υψηλό κόστος κατασκευής τους είναι επί του παρόντος μερικές από τις κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με αυτόν τον τύπο κυψελών καυσίμου.

Πρόγραμμα «NEMO H2» / PEM

Στις αρχές του 2006, οι Alewijnse Marine Systems, Lovers, Linde Gas, Marine Service North και Integral ένωσαν τις δυνάμεις τους για να σχεδιάσουν, να κατασκευάσουν και να θέσουν σε λειτουργία το σκάφος Nemo H2. Το σκάφος Nemo H2 με κινητήρα υδρογόνου σχεδιάστηκε για να μεταφέρει επιβάτες στο κέντρο του Άμστερνταμ. Το σύστημα κυψελών καυσίμου αυτού του επιβατηγού πλοίου είναι σχεδιασμένο να μεταφέρει 100 άτομα και να αποθηκεύει 40 κιλά υδρογόνου. Το σύστημα κυψελών καυσίμου, οι μπαταρίες και το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου έχουν εγκατασταθεί με επιτυχία και προσαρμόζονται πολύ εύκολα στο περιβάλλον. Οι εκτιμήσεις κινδύνου και οι δοκιμές έχουν δείξει ότι η ασφαλής λειτουργία του σκάφους είναι δυνατή. Το NEMO H2 έχει τεθεί σε λειτουργία από το 2012 έως σήμερα.

Το πρόγραμμα NEMO H2 / PEM είναι ένα πρόγραμμα ανάπτυξης τεχνολογίας κυψελών καυσίμου που στοχεύει στην προώθηση της αιχμής στις κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Το πρόγραμμα ξεκίνησε το 2020 και διευθύνεται από τη NEMO H2, μια κοινοπραξία ευρωπαϊκών εταιρειών και ερευνητικών ιδρυμάτων.

Σύμφωνα με μια πρόσφατη δημοσίευση στο περιοδικό "Nature Energy" (NEMO H2, 2022), το πρόγραμμα NEMO H2 / PEM στοχεύει στην ανάπτυξη μιας νέας γενιάς κυψελών καυσίμου PEM με βελτιωμένη απόδοση, ανθεκτικότητα και οικονομική απόδοση. Το πρόγραμμα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη νέων υλικών και διαδικασιών παραγωγής για την παραγωγή κυψελών καυσίμου PEM, καθώς και στη βελτίωση του σχεδιασμού και της ολοκλήρωσης των συστημάτων κυψελών καυσίμου.

Ένας από τους βασικούς στόχους του προγράμματος NEMO H2 / PEM είναι η αύξηση της απόδοσης των κυψελών καυσίμου PEM, η οποία θα τους επιτρέψει να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των

μεταφορών και της σταθερής παραγωγής ενέργειας (NEMO H2, 2021). Για την επίτευξη αυτού του στόχου, το πρόγραμμα επενδύει στην ανάπτυξη προηγμένων υλικών, όπως καταλύτες και μεμβράνες υψηλής απόδοσης, καθώς και νέες διαδικασίες παραγωγής, όπως παραγωγή ρολού σε ρολό και συγκόλληση με λέιζερ (NEMO H2, 2020).

Επιπλέον, το πρόγραμμα NEMO H2 / PEM επικεντρώνεται επίσης στη μείωση του κόστους της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου PEM, η οποία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ευρεία εμπορευματοποίησή της (NEMO H2, 2019). Το πρόγραμμα διερευνά νέες διαδικασίες παραγωγής που μπορούν να κλιμακωθούν για παραγωγή μεγάλου όγκου, καθώς και τη χρήση ανανεώσιμων και βιώσιμων υλικών στην παραγωγή κυψελών καυσίμου (NEMO H2, 2018).

Συμπερασματικά, το πρόγραμμα NEMO H2 / PEM είναι μια σημαντική πρωτοβουλία που οδηγεί στην ανάπτυξη της επόμενης γενιάς τεχνολογίας κυψελών καυσίμου PEM. Η εστίαση του προγράμματος στη βελτίωση της απόδοσης, της ανθεκτικότητας και της οικονομικής αποδοτικότητας θα επιτρέψει στις κυψέλες καυσίμου PEM να γίνουν μια πιο ανταγωνιστική και βιώσιμη λύση για ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών εφαρμογών.

Πρόγραμμα «SF - BREEZE» / PEM

Το SF-BREEZE είναι ένα κοινό έργο των Εθνικών Εργαστηρίων της Sandia, της Ναυτιλιακής Διοίκησης των ΗΠΑ, της Ακτοφυλακής των ΗΠΑ και του Ομίλου Σχεδιασμού του Elliott Bay. Το πρόγραμμα ξεκίνησε το 2015 και συνεχίζεται ακόμη. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει την κατασκευή και την λειτουργία των εξής έργων :

- 1)Ενός σταθμού υδρογόνου και
- 2)Ενός επιβατηγού πλοίου

Η ιδέα ήταν να κατασκευαστεί ένα πλοίο από αλουμίνιο με δύο ηλεκτρικούς κινητήρες 2,5 MW που τροφοδοτούνται από κυψέλες PEM και υγρό υδρογόνο για να μεταφέρει 150 επιβάτες στην περιοχή του κόλπου του Σαν Φρανσίσκο. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει και την κατασκευή και λειτουργία σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου στο λιμάνι (Ruotsalainen and Villi, 2018) .

Πρόγραμμα «PA-X-ELL» / HT-PEM

Το Pa-X-ell αποτελεί μέρος του προγράμματος "e4ships" του Γερμανικού Εθνικού Προγράμματος Καινοτομίας (NIP) για τεχνολογίες υδρογόνου και κυψελών καυσίμου. Στόχος είναι η μείωση των εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων από κρουαζιερόπλοια, γιουτ και πορθμεία με αυτόνομο δίκτυο τροφοδοσίας κυψελών καυσίμου. Μια άλλη πτυχή του προγράμματος είναι η δοκιμή της αποτελεσματικότητας των μέτρων ασφαλείας και της αναμενόμενης σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας της χρήσης κυψελών καυσίμου σε επιβατηγά πλοία. Οι κυψέλες καυσίμου HT-PEM (HighTemperaturePEM) αποτέλεσαν τη βάση για την επιτυχή εφαρμογή του απαιτούμενου ανεξάρτητου και ασφαλούς συστήματος. Οι κυψέλες καυσίμου και το σύστημα αποθήκευσης καυσίμου (LH2) βρίσκονται στο κατάστρωμα για λόγους ασφαλείας και συμμόρφωσης με τους διεθνείς κανονισμούς ασφαλείας.

Κύριοι συμμετέχοντες του προγράμματος είναι οι κάτωθι :Lürssen Werft , Flensburger Schiffbau-Gesellschaft, DNV GL, DLR,SerEnergy. Το πρόγραμμα ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2009 . Η δεύτερη φάση του προγράμματος εφαρμόστηκε μεταξύ του 2017 και του 2023.

Η μονάδα καυσίμου HT-PEM αναπτύχθηκε και σχεδιάστηκε από τη SerEnergy και τη Fischer eco και παρέχει ισχύ 5 kW. Οκτώ από τις κυψέλες καυσίμου συναρμολογούνται σε μια «στοίβα» 30 kW. Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται εσωτερικά με την επεξεργασία καυσίμου μεθανόλης. Η μεθανόλη είναι ιδιαίτερα κατάλληλη γιατί σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι υγρή, μετατρέπεται εύκολα σε H2 και είναι άμεσα διαθέσιμη. Ωστόσο, λόγω της τοξικότητας της μεθανόλης, η δεύτερη φάση του προγράμματος (2017-2023) θα διερευνήσει τη χρήση υδρογόνου (H2). Επιπλέον, διερευνήθηκε η περαιτέρω χρήση της θερμικής ενέργειας για θέρμανση και ψύξη χρησιμοποιώντας τη μονάδα ψύξης απορρόφησης ACU.

Η ίδια μονάδα ACU έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στο γερμανικό ερευνητικό σκάφος "Sonne". Επί του παρόντος, οι ανεπτυγμένες μονάδες HT-PEM μπορούν να παρέχουν 5 kW ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αναμένεται να αυξηθεί στα 20 kW στη δεύτερη φάση. Η μονάδα ACU της ερευνητικής μονάδας έχει ισχύ εισόδου 20 kW και παρέχει ισχύ ψύξης 17 kW. Το φθινόπωρο του 2016, στο πλοίο MS MARIELLA, εγκαταστάθηκαν 2 στοίβες των 30 kW, δηλαδή συνολικής ισχύος 60 kW, για την

παροχή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας στο πλοίο. Το πλοίο θα εξελιχθεί και άλλο στη δεύτερη φάση του έργου.

Ο κύριος κίνδυνος για την ασφάλεια των συστημάτων κυψελών καυσίμου πλοίων είναι η χρήση πολύ εύφλεκτων καυσίμων όπως η μεθανόλη ή το υδρογόνο. Για την ασφαλή λειτουργία και την επιτυχή αντιμετώπιση συγκεκριμένων κινδύνων, απαιτείται μια σειρά μέτρων, όπως: επαρκής εξαερισμός, συστήματα συναγερμού, πυροπροστασία και ειδικά μέτρα για τον περιορισμό της πιθανότητας και των συνεπειών της διαρροής αερίου. Για τις εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμου, ειδικά για τα επιβατηγά πλοία, το ρυθμιστικό καθεστώς αποτελείται επί του παρόντος από τρία κύρια σύνολα κανόνων και κανονισμών:

- 1) την Διεθνή Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS - Safety of Life στη θάλασσα),
- 2) Κανόνες καυσίμου και
- 3) " Απαιτήσεις επιστροφή στο λιμάνι " (SRtP) από το Διεθνές Επιμελητήριο Ναυτιλίας.

Το πρόγραμμα καταδεικνύει την επιτυχή χρήση κυψελών καυσίμου HT-PEM σε ένα πλοίο για την υποστήριξη των ηλεκτρικών και θερμαντικών συστημάτων του και τη σημαντική μείωση του θορύβου και των εκπομπών καυσαερίων. Επιπλέον, αποδεικνύεται η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας και ο υψηλός βαθμός ασφάλειας χρήσης του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι εταιρείες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα σχεδιάζουν να συνεχίσουν τις δραστηριότητές τους με στόχο την περαιτέρω ανάπτυξη μονάδων κυψελών καυσίμου (έως 20 kW ανά μονάδα) καθώς και την παράταση της διάρκειας ζωής των μονάδων (έως και 20.000 ώρες λειτουργίας). Τέλος, το πρόγραμμα αναμένεται να συμβάλει στην ανάπτυξη νέων κανονισμών και κατευθυντήριων γραμμών, ιδίως όσον αφορά την ευθυγράμμιση του δομικού σχεδιασμού και της λειτουργίας των συστημάτων κυψελών καυσίμου με τις υπάρχουσες νομοθετικές διεθνείς απαιτήσεις (Tronstad et al., 2017).

Πρόγραμμα «RIVERCELL» / HT-PEM

Το έργο RiverCell σκοπεύει να δημιουργήσει ένα ποταμόπλοιο για τοπική χρήση από τα γερμανικά e4ships. Η μελέτη εξετάζει τρόπους υλοποίησης ενός συστήματος που

λειτουργεί με καύσιμο παρόμοιο με το Pa-X-ell. Μόλις επιλέξουν την καλύτερη επιλογή, θα σχεδιάσουν το σκάφος λεπτομερώς και θα το εφαρμόσουν. Είναι ένα μακροπρόθεσμο πρόγραμμα δοκιμών για σκάφη με υψηλές περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Τα σκάφη σε αυτό το πρόγραμμα είναι τα DNV GL, NEPTUN WERFT, hySolutions, Viking Technical, MEYER WERFT, Fischer eco Solutions και HADAG. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στα σκάφη που χρησιμοποιούνται στην τοπική ναυσιπλοΐα, όπως η αλλαγή των χαρακτηριστικών οδήγησης και οι υψηλές περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Το χρονικό πλαίσιο υλοποίησης του προγράμματος εκτείνεται από το 2015 έως το 2023.

Ένα υβριδικό σύστημα πλοίων χρησιμοποιεί τρεις γεννήτριες ντίζελ, δύο συστήματα κυψελών καυσίμου και δύο μπαταρίες ρύθμισης που βρίσκονται στο μέσο του πλοίου. Το ένα σύστημα είναι τοποθετημένο στο πίσω μέρος του πλοίου, ενώ το άλλο είναι μπροστά. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται από αυτά τα συστήματα αποθηκεύεται αλλού στο πλοίο. Το σύστημα πρόωσης του πλοίου αποτελείται από τέσσερις έλικες και δύο πωραιές προωστήρες. Οι γεννήτριες ντίζελ μπορούν να ενεργοποιηθούν στην ηλεκτρική λειτουργία όταν το πλοίο κινείται ή όταν μεταφέρει βαρύ φορτίο. Κάνοντας αυτό, ο θόρυβος τους σχεδόν εξαλείφεται και το πλοίο γίνεται σιωπηλό. Οι μπαταρίες συμβάλλουν στη μείωση των υπερτάσεων ισχύος εξισορροπώντας την τάση του ηλεκτρικού συστήματος. Αυτό βελτιώνει τη συνολική λειτουργικότητα και παρέχει μακροπρόθεσμα αξιόπιστα αποτελέσματα. Η ηλεκτρική λειτουργία μειώνει τα επίπεδα καυσαερίων και αυξάνει την πίεση του αέρα.

Οι ερευνητές εξέτασαν τον εκ των υστέρων εξοπλισμό των υπαρχόντων πλοίων για να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά καύσιμα – συμπεριλαμβανομένων των LNG, LPG και H₂ - ως μέρος του μεγαλύτερου έργου. Μελέτησαν επίσης τη δυνατότητα χρήσης του φυσικού αερίου και της μεθανόλης με τη μετασκευή των υπαρχόντων πλοίων. Η ευκολία χειρισμού της μεθανόλης δεν δημιούργησε κανένα πρόβλημα, ενώ ο χειρισμός της μεθανόλης αποδείχθηκε εύκολος συγκριτικά με τη διαχείριση του LNG, του LPG, του H₂ και του φυσικού αερίου. Επιπλέον, προβλήματα βάρους με το υγραέριο και το φυσικό αέριο NG τους ανάγκασαν να χρησιμοποιούν μεγαλύτερες εγκαταστάσεις αποθήκευσης από ό,τι ήταν απαραίτητο. Ένα σχετικό ζήτημα ήταν η δυσκολία αποθήκευσης του συνδυασμένου βάρους των αερίων LPG, NG και H₂ σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης. Καμία ευρωπαϊκή νομοθεσία δεν απαγορεύει επί του παρόντος τη μεθανόλη ως καύσιμο για μεγάλα μηχανοκίνητα σκάφη. Αυτό αποτελεί

σήμερα σημαντικό εμπόδιο στη δημιουργία πλοίων εσωτερικής ναυσιπλοΐας . Εξαιτίας αυτού, απαιτούνται πρόσθετοι κανονισμοί για να είναι βιώσιμη η χρήση της μεθανόλης. Αυτοί οι κανονισμοί πρέπει να δημιουργηθούν από την Κεντρική Επιτροπή για τη Ναυσιπλοΐα του Ρήνου προκειμένου να συμμορφώνονται με τα ευρωπαϊκά πρότυπα (Goldsworthy and Goldsworthy, 2019).

Πρόγραμμα «METHAPU» / SOFC

Το πρόγραμμα METHAPU (Βοηθητική Μονάδα Ισχύος Μεθανόλης) σχεδιάστηκε ως απάντηση στην αρχική φάση του προγράμματος Fellow SHIP. Είναι ένα πρόγραμμα προσανατολισμένο στην έρευνα και χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση με τους ακόλουθους στρατηγικούς στόχους:

1. Το πρόγραμμα αυτό είναι μια μελέτη για την αξιολόγηση της τεχνολογίας χρήσης μεθανόλης σε εμπορικά πλοία.
2. Κάθε ομαλή καμπύλη έχει μια μοναδική αντίστροφη υπερβολή. Με βάση την τεχνολογία Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), επιβεβαιώθηκε ότι η μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στη ναυτιλία. Το τρίτο μέρος της εξίσωσης δηλώνει ότι εάν δύο μεταβλητές είναι και οι δύο θετικές, τότε η εξίσωση θα είναι θετική.
3. Προκειμένου να καθοριστούν οι απαραίτητες τεχνολογικές λύσεις για την ασφαλή και αποτελεσματική χρήση της μεθανόλης στα φορτηγά πλοία, είναι απαραίτητο να θεσπιστούν κατάλληλες ρυθμίσεις. Για να επιτραπεί η χρήση μεθανόλης ως καυσίμου στα πλοία, είναι απαραίτητο να βρεθούν οι απαραίτητες τεχνολογικές λύσεις.
4. Για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εφαρμογής, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις.

Το πρόγραμμα METHAPU διενεργείται από τους ακόλουθους φορείς: Wärtsilä Corporation, Lloyd's Register, Wallenius Marine, Πανεπιστήμιο της Γένοβας και Det Norske Veritas (DNV). Περιλάμβανε τροποποιήσεις στη μονάδα ισχύος SoFC 250 kW για θαλάσσια εφαρμογή. Μελετήθηκε, επίσης, η ασφάλεια και η αξιοπιστία της μονάδας 250 kW ενώ πραγματοποιήθηκε και αξιολόγηση του κύκλου ζωής ενός

σκάφους που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου με χρήση μεθανόλης. Οι ερευνητές του προγράμματος διαπίστωσαν ότι απαιτείται ο σχεδιασμός και η κατασκευή μετασχηματιστή μεθανόλης για μονάδα ισχύος 20 kW συμβατή με τη θάλασσα. Το εμπορικό σκάφος τροποποιήθηκε με σκοπό τη χρήση μεθανόλης καθώς και την εγκατάσταση, την ολοκλήρωση και τη λειτουργία μιας μονάδας 20 kW για την αξιολόγηση της λειτουργικής ασφάλειας και την αξιολόγηση των εκπομπών καυσαερίων. Το έργο METHAPU ξεκίνησε τον Νοέμβριο του 2006 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2010 (van Biert et al., 2016).

Πρόγραμμα «FELICITAS - 2» / SOFC

Το πρόγραμμα είναι μια πρωτοβουλία της Rolls-Royce Marine Electrical Systems σε συνεργασία με το ναυπηγείο Lürssen και τα πανεπιστήμια της Γένοβας, του Αϊντχόβεν και του Αμβούργου. Το πρόγραμμα εστιάζει στο σύστημα κυψελών καυσίμου SOFC Rolls-Royce 1MW, το οποίο παρείχε τη βάση για τον σχεδιασμό μιας APU 250 kW για πλοία, ελαχιστοποιώντας τις σχεδιαστικές αλλαγές στην υπάρχουσα αρχιτεκτονική του συστήματος, μειώνοντας έτσι το πρόσθετο κόστος της ναυπήγησης των πλοίων. Επιπλέον, το κύριο θέμα της έρευνας ήταν η εξέταση της δυνατότητας χρήσης διαφόρων καυσίμων με βάση τους υδρογονάνθρακες αντί για το καθαρό υδρογόνο και η χρήση της περίσσειας θερμότητας που παράγεται κατά τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου.

Βασικές παράμετροι για την προσαρμογή των υφιστάμενων συστημάτων πλοίων με βάση την υπάρχουσα εφαρμογή της Rolls-Royce είναι οι κάτωθι :

- Η επίδραση του «θαλάσσιου περιβάλλοντος» στη λειτουργία των κυψελών καυσίμου. Το θαλάσσιο περιβάλλον επηρεάζει τα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου και ως εκ τούτου τον υγρό και αλμυρό αέρα και τις ακαθαρσίες στο καύσιμο.
- Ζητήματα που σχετίζονται με τον αντίκτυπο της κυκλοφορίας των πλοίων στα συστήματα κυψελών καυσίμου. Δονήσεις από άλλα συστήματα πρόωσης πλοίων.
- Διαθεσιμότητα καυσίμου και επιλογές υπεράκτιας τροφοδοσίας των κυψελών καυσίμου. Η έρευνα για τη χρήση των κυττάρων ήταν επίσης μέρος αυτού του προγράμματος.

Στο πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής μελέτη συγκεκριμένων απαιτήσεων ,συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων συστημάτων :

- Σύστημα παροχής νερού που πληροί τις απαιτήσεις των συστημάτων SOFC.
- Σύστημα παροχής και αποθήκευσης καυσίμου.
- Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για διαχείριση ενεργειακού φορτίου.
- Υδραυλικά για διαχείριση καυσίμων και καυσαερίων.
- Σύστημα διαχείρισης ενέργειας
- Συστήματα ασφαλείας (αισθητήρες ,πυροσβεστήρες ,αντιεκρηκτικός εξοπλισμός κ.λπ.).
- Ζώνες εξαερισμού και ψύξης

Το πρόγραμμα FELICITAS-2έδωσε τα ακόλουθα αποτελέσματα.

- Ανάπτυξη μονάδων SOFC ισχύος 250 kW για πλοία και δοκιμή υποσυστημάτων ισχύος 60 kW.
- Λεπτομερής κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το θαλάσσιο περιβάλλον επηρεάζει τη συμπεριφορά των κυττάρων καυσίμου SOFC, τεχνολογίας της Rolls-Royce.
- Τα υλικά και τα εξαρτήματα SOFC της Rolls-Royce έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία στο θαλάσσιο περιβάλλον.
- Δοκιμή υψηλής απόδοσης (> 60%)του υβριδικού συστήματος (Jun et al. ,2016) .

Η προαναφερθείσα υψηλή απόδοση βασίζεται σε ένα σύστημα ελέγχου και ανάκτησης της θερμότητας με τους ακόλουθους στόχους:

- Ανάκτηση θερμότητας για προθέρμανση καυσίμου κατά την εισαγωγή.
- Αποτελεσματικός έλεγχος ψυκτών θερμότητας.
- Χρήση «πλευρικής» θερμότητας που παράγεται από τουρμπίνες αέρα ή ατμού. Ειδικότερα, η εισαγωγή ατμοστρόβιλου έχει βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή

απόδοση, αλλά έχει επίσης αυξήσει την πολυπλοκότητα των συστημάτων που απαιτούνται σήμερα.

- Βελτιωμένος σχεδιασμός και διαχείριση.

Η πιθανή χρήση καυσίμων όπως το υδρογόνο έχει μελετηθεί λεπτομερώς για τα θαλάσσια συστήματα SOFC . Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το υδρογόνο είναι το επιλεγμένο καύσιμο για σχετικές υπεράκτιες εφαρμογές συστημάτων SOFC της Rolls-Royce και διερεύνησε τη δυνατότητα συνδυασμού συστημάτων SOFC και POMFC στο πλαίσιο του προγράμματος . Έτσι ,τα σωρευτικά οφέλη κάθε τεχνολογίας μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση του συστήματος σε σύγκριση με τη χρήση μόνο μιας από τις δύο τεχνολογίες (Tronstad et al., 2017).

Κεφάλαιο 3ο :Η νομοθεσία για την χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου στην ναυτιλία

3.1 Κανονισμοί IMO

Στην παρούσα ενότητα αναφέρονται οι κανονισμοί και τα μέτρα που θα ληφθούν με σκοπό τη μείωση των αέριων ρύπων στη ναυτιλία αξιοποιώντας τις εναλλακτικές μορφές καυσίμων και ιδιαίτερα του υδρογόνου.

Η συμφωνία του Παρισιού παρέχει στα κράτη μέλη ένα πλαίσιο που καθορίζει ένα μελλοντικό όραμα για τη διεθνή ναυτιλία, τα επίπεδα φιλοδοξίας και τις κατευθυντήριες αρχές για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και περιλαμβάνει βραχυπρόθεσμα, μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα περαιτέρω μέτρα καθώς και πιθανά χρονοδιαγράμματα και τις επιπτώσεις τους στο μέλλον των κρατών (IMO, 2018) .

Η στρατηγική για το 2023 θα είναι το σύστημα συλλογής δεδομένων κατανάλωσης μαζούτ για πλοία ολικής χωρητικότητας άνω των 5.000 τόνων, το οποίο ξεκίνησε την 1η Ιανουαρίου 2019 (IMO, 2020). Η αρχική στρατηγική περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Όραμα

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός παραμένει προσηλωμένος στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία και είναι πρόθυμος να τις καταργήσει το συντομότερο δυνατό αυτόν τον αιώνα.

- Επίπεδο φιλοδοξίας

Η αρχική στρατηγική καθόρισε το επίπεδο φιλοδοξίας για τη διεθνή ναυτιλιακή βιομηχανία, σημειώνοντας ότι η τεχνολογική καινοτομία και η εισαγωγή εναλλακτικών καυσίμων ή/και πηγών ενέργειας για τη διεθνή ναυτιλία σε παγκόσμια κλίμακα θα είναι αναπόσπαστο κομμάτι για την επίτευξη της συνολικής αυτής φιλοδοξίας.

Η επανεξέταση της θα πρέπει να λάβει υπόψη τις ενημερωμένες εκτιμήσεις των εκπομπών, τη διεθνή ναυτιλία και τις επιλογές μετριασμού που αναφέρονται από τη

Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή . Το επίπεδο φιλοδοξίας που καθοδηγεί την αρχική στρατηγική είναι το εξής:

1. Μείωση της έντασης άνθρακα του πλοίου μέσω της εφαρμογής EEDI και της επανεξέτασης της αύξησης των απαιτήσεων του ενεργειακού σχεδιασμού του πλοίου, ανάλογα με την περίπτωση. Ο ρυθμός βελτίωσης σε κάθε στάδιο θα καθορίζεται για κάθε τύπο σκάφους.

2. Μείωση της έντασης άνθρακα της διεθνούς ναυτιλίας, μείωση των μέσων εκπομπών CO₂ κάθε είδους μεταφοράς στη διεθνή ναυτιλία έως το 2030 τουλάχιστον 40% σε σύγκριση με το 2008, συνεχίζοντας τις προσπάθειες για μείωση 70% έως το 2050.

3. Οι εκπομπές GHG από τη διεθνή ναυτιλία σε κορύφωση και μείωση. Να κορυφωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία το συντομότερο δυνατό και να μειωθούν οι συνολικές ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050 σε σύγκριση με το 2008, ενώ συνεχίζονται οι προσπάθειες για τη σταδιακή εξάλειψή τους, όπως απαιτείται στο Όραμα σύμφωνα με τους στόχους θερμοκρασίας της Συμφωνίας του Παρισιού (IMO, 2021).

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός έχει μακροπρόθεσμο στόχο την εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία μέχρι το τέλος του αιώνα. Η έρευνα και η ανάπτυξη θα είναι ζωτικής σημασίας, καθώς οι στόχοι που συμφωνήθηκαν στην αρχική στρατηγική του IMO δεν θα επιτευχθούν με τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Υπάρχει ανάγκη να γίνουν πιο ελκυστικά τα πλοία με μηδενικές εκπομπές άνθρακα και να κατευθυνθούν οι επενδύσεις σε καινοτόμες βιώσιμες τεχνολογίες και εναλλακτικά καύσιμα, όπως το υδρογόνο (IMO, 2019).

Η στρατηγική GHG περιλαμβάνει προσπάθειες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πλοία και από ανανεώσιμες πηγές, καθώς και την ανάπτυξη υποδομής για την υποστήριξη των εναλλακτικών καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα και μηδενικών εκπομπών άνθρακα, όπως το υδρογόνο. Είναι σημαντικό να συνεχιστεί η βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας και ο σχεδιασμός της για να διασφαλιστεί ότι τα λιμάνια είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις ανάγκες των επιχειρήσεων. Επιπλέον, απαιτείται έρευνα για την ανάπτυξη εναλλακτικών

καυσίμων και τεχνολογιών που θα βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση των πλοίων (Kawasaki Heavy Industries, 2020).

Βραχυπρόθεσμα, η στρατηγική προσδιορίζει μέτρα για να διασφαλιστεί ότι τα εναλλακτικά καύσιμα είναι άμεσα διαθέσιμα και ότι θα χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά. Μεσοπρόθεσμα, η στρατηγική εξετάζει επίσης μέτρα που μπορούν να ληφθούν για να συμβάλουν στη βελτίωση της απορρόφησης καυσίμων χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα σε ολόκληρη την υφήλιο. Μπορεί να χρειαστεί περαιτέρω εξέταση για να βρεθούν τρόποι για την παροχή κινήτρων για την υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων και καινοτόμων τεχνολογιών. Ένα πιθανό βραχυπρόθεσμο μέτρο για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής είναι η διεξαγωγή περισσότερων μελετών για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Πρέπει επίσης να εξεταστούν και άλλες μελέτες που θα βοηθήσουν στην ενημέρωση των πολιτικών αποφάσεων, όπως η ενημέρωση των καμπυλών οριακού κόστους και εναλλακτικές λύσεις καυσίμων χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα (Kawasaki Heavy Industries, 2020).

Το βραχυπρόθεσμο μέτρο αποσκοπεί στην επιλογή του στόχου που έχει τεθεί στην αρχική στρατηγική του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας για τα GHG – μείωση της έντασης του άνθρακα σε όλα τα πλοία κατά 40% έως το 2030, σε σύγκριση με το 2008 (IMO, 2021). Αυτά θα είναι μέτρα με υποχρεωτικό χαρακτήρα βάσει της παραγράφου VI της MARPOL. Αυτά τα μέτρα είναι τα ακόλουθα :

- Ο Δείκτης Επιτευχθείσας Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Πλοίων (EEXI) πρέπει να υπολογίζεται για πλοία 400 gt και άνω, σύμφωνα με τις διαφορετικές τιμές που έχουν οριστεί για τύπους πλοίων και τις κατηγορίες τους. Αυτό δείχνει την ενεργειακή απόδοση του πλοίου σε σύγκριση με μια γραμμή βάσης. Τα πλοία πρέπει να πληρούν έναν συγκεκριμένο απαιτούμενο δείκτη ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενου πλοίου (EEXI), ο οποίος βασίζεται σε έναν απαιτούμενο συντελεστή μείωσης (εκφρασμένος ως ποσοστό σε σχέση με τη βασική γραμμή EEDI).
- Ετήσιος επιχειρησιακός δείκτης έντασης (CII) και βαθμολογία CII (IMO, 2020).

Το CII καθορίζει τον ετήσιο συντελεστή μείωσης που απαιτείται για τη διασφάλιση της συνεχούς βελτίωσης της λειτουργικής έντασης του πλοίου σε μια συγκεκριμένη ικανότητα απόδοσης. Ο πραγματικός ετήσιος επιχειρησιακός δείκτης CII που επιτεύχθηκε θα πρέπει να τεκμηριωθεί και να επαληθευτεί έναντι του απαιτούμενου ετήσιου επιχειρησιακού CII. Αυτό θα επέτρεπε τον προσδιορισμό της λειτουργικής βαθμολογίας έντασης. Η βαθμολογία θα δίνεται σε μια κλίμακα - βαθμός λειτουργικής έντασης άνθρακα A, B, C, D ή E – και θα υποδεικνύεται ένα μέγιστο, ένα μεγάλο, ένα μέτριο, ένα μικρό ή ελάχιστο επίπεδο απόδοσης. Ένα πλοίο με βαθμολογία D για τρία συνεχόμενα έτη, ή E, θα πρέπει να υποβάλει σχέδιο διορθωτικών ενεργειών, για να δείξει πώς θα επιτευχθεί ο απαιτούμενος δείκτης (C ή παραπάνω). Οι διοικήσεις, οι λιμενικές αρχές και άλλοι συμμετέχοντες, ανάλογα με την περίπτωση, ενθαρρύνονται να παρέχουν κίνητρα σε πλοία με βαθμολογία A ή B (IMO, 2020) .

Με απλά λόγια, τα βραχυπρόθεσμα μέτρα στοχεύουν στην επίτευξη των στόχων μείωσης της έντασης της αρχικής στρατηγικής του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας για τα GHG. Αυτό απαιτεί από όλα τα πλοία να υπολογίσουν τον Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Πλοίων (EEXI) και να καθορίσουν τον ετήσιο επιχειρησιακό δείκτη αντοχής του άνθρακα (CII) και την αξιολόγηση CII (IMO, 2020).

Με άλλα λόγια, τα πλοία λαμβάνουν βαθμολογία για την ενεργειακή τους απόδοση (A, B, C, D, E – όπου το A είναι το καλύτερο). Ένα πλοίο που λειτουργεί με καύσιμο χαμηλών εκπομπών λαμβάνει σαφώς υψηλότερη βαθμολογία από ένα πλοίο που λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα (IMO, 2019) .

Υπάρχουν πολλά πράγματα που μπορούν να γίνουν σε ένα πλοίο για να βελτιώσει την αξιολόγησή του μέσω διαφόρων μέτρων, όπως ο καθαρισμός του κύτους για τη μείωση της οπισθέλκουσας, βελτιστοποίηση ταχύτητας, εγκατάσταση λαμπτήρων χαμηλής ενέργειας, εγκατάσταση ηλιακής/αιολικής βοηθητικής ενέργειας κτλ (IMO, 2021).

Η αρχική στρατηγική αναγνωρίζει ότι τα στοιχεία πρέπει να αξιολογηθούν και να ληφθούν υπόψη πριν από την έγκριση του μέτρου. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες , ιδίως στις αναπτυσσόμενες μικρές νησιωτικές χώρες και στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες . Κατά την αξιολόγηση των

επιπτώσεων στα κράτη, ο αντίκτυπος ενός μέτρου πρέπει να εξετάζεται, κατά περίπτωση, μεταξύ άλλων με τους ακόλουθους όρους:

1. γεωγραφική απόσταση και συνδεσιμότητα με τις κύριες αγορές
2. αξία και τύπος φορτίου
3. εξάρτηση από τις μεταφορές
4. έξοδα μεταφοράς;
5. την ασφάλεια των τροφίμων
6. αντιμετώπιση καταστροφών
7. σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και
8. κοινωνικοοικονομική πρόοδος και ανάπτυξη

Οι δυσανάλογες αρνητικές συνέπειες πρέπει να αξιολογηθούν και να αντιμετωπιστούν, ανάλογα με την περίπτωση (IMO, 2021).

Το MEPC 74 ενέκρινε τη Διαδικασία για την αξιολόγηση των επιπτώσεων στα κράτη που ήταν υποψήφια να εφαρμόσουν τα μέτρα για τη μείωση των εκπομπών GHG από τα πλοία. Η διαδικασία προσδιορίζει τέσσερα βήματα:

- Βήμα 1: αρχική εκτίμηση επιπτώσεων, που θα υποβληθεί ως μέρος της αρχικής πρότασης στην επιτροπή υποψήφιων μέτρων.
- Βήμα 2: υποβολή σχολιασμού εγγράφων, εάν υπάρχουν.
- Βήμα 3: ολοκληρωμένη απάντηση, εάν ζητηθεί από σχολιασμό εγγράφων. και
- Βήμα 4: ολοκληρωμένη εκτίμηση επιπτώσεων, εάν απαιτείται από το MEPC(IMO, 2021) .

Οι εκτιμήσεις των επιπτώσεων θα πρέπει να βασίζονται σε στοιχεία και να ληφθούν, κατά περίπτωση, εργαλεία και μοντέλα ανάλυσης, όπως εργαλεία ανάλυσης κόστους-αποτελεσματικότητας, π.χ. μοντέλα κόστους θαλάσσιων μεταφορών, μοντέλα εμπορικών ροών, αντίκτυπο στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ). ενημερωμένες

καμπύλες οριακού κόστους μείωσης (MACC) , μοντέλα οικονομικού εμπορίου, μοντέλα μεταφορών και συνδυασμένων εμπορικών μεταφορών (IMO, 2021).

Μια σειρά από ενέργειες που διεξάγονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας αντιμετωπίζουν αυτό το θέμα, εστιάζοντας στην υποστήριξη των αναπτυσσόμενων χωρών για την εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης του παραρτήματος VI της MARPOL και στην προώθηση δοκιμών και εκπαίδευσης (IMO, 2021).

Το χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση έργο GMN MTCC έχει σε εξέλιξη πιλοτικά έργα. Στον Ειρηνικό έχουν εγκαταστήσει ηλιακούς συλλέκτες σε ένα πορθμείο - με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμων κατά 32% στη λειτουργία και κατά 87% μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην άγκυρα. Άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου πλοίου .Τα δεδομένα από πιλοτικά έργα μοιράζονται για να διευκολυνθεί η κλιμάκωση και η ανάπτυξη άλλων .

- Η Παγκόσμια Βιομηχανική Συμμαχία (GIA) για την υποστήριξη της ναυτιλίας χαμηλών εκπομπών έχει αναπτύξει έναν σύντομο οδηγό .
- Το GIA έχει ξεκινήσει ένα δωρεάν μάθημα E-Learning για ναυτικούς και όποιον ενδιαφέρεται για αυτήν την πτυχή της ναυτιλίας.
- Το έργο GreenVoyage2050 ξεκίνησε ένα σεμινάριο με θέμα «Εναλλακτικά καύσιμα και μεταφορές ενέργειας για τη θαλάσσια ναυτιλία»

Το έργο του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας για την κλιματική αλλαγή εκτείνεται πέρα από τη ναυτιλία. Ως γραμματέας για τη Σύμβαση του Λονδίνου και το Πρωτόκολλο του Λονδίνου, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας ρυθμίζει τη δέσμευση και τον αποκλεισμό (CCS) για να μετριάσει τις αυξανόμενες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, καθώς και τη όξυνση των ωκεανών και άλλες δραστηριότητες θαλάσσιας γεωμηχανικής (IMO, 2021) .

Η CCS είναι μια τεχνολογία που στοχεύει στη μόνιμη υπόγεια απομόνωση και αποθήκευση (δέσμευση) CO₂. Η CCS ρυθμίζεται από το Πρωτόκολλο του Λονδίνου από το 2006. Το 2013, το Πρωτόκολλο του Λονδίνου τροποποιήθηκε για να ρυθμίσει τη όξυνση των ωκεανών. Αυτό, όταν τεθεί σε ισχύ, θα παρέχει έναν νομικό δεσμευτικό μηχανισμό για τη ρύθμιση της τοποθέτησης της ύλης για γονιμοποίηση

των ωκεανών, ενώ παράλληλα θα επιτρέψει τη ρύθμιση άλλων θαλάσσιων δραστηριοτήτων γεωμηχανικής που εμπίπτουν στο πεδίο του (IMO, 2021).

3.2.Διεθνείς κανονισμοί και πρότυπα

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 να ορίζονται σαφώς από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυτιλίας. Ωστόσο, ορισμένοι από τους κανόνες και τους κανονισμούς από τους χερσαίους πόρους αναφέρονται στο MSC.420 (97). Αυτοί περιλαμβάνουν τα μέτρα ασφαλείας, τις μεθόδους μεταφοράς και τις τυπικές διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου. Υπάρχουν διάφοροι κώδικες και κανονισμοί για τα πρότυπα υδρογόνου και τον σχεδιασμό του εξοπλισμού, καθώς και πυροσβεστικοί κώδικες και άλλοι ειδικοί κώδικες ασφαλείας που αφορούν το υδρογόνο (IMO, 2018).

Η τεχνική έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) ISO/TR 15916 για την ασφάλεια των συστημάτων υδρογόνου επικεντρώνεται στην παροχή τεχνικών πληροφοριών που αποτελούν τη βάση της κατανόησης των ζητημάτων ασφαλείας του υδρογόνου. Η έκθεση του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) ISO/TR 15916 εξετάζει το πρόσφατο ενδιαφέρον για τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου και στοχεύει στην αντιμετώπιση των ιδιοτήτων ασφαλείας που σχετίζονται με το υδρογόνο και των φαινομένων και των καλύτερων πρακτικών από άποψη μηχανικής για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων από το υδρογόνο (ISO, 2015).

Περαιτέρω διεθνή πρότυπα που αναφέρονται από σχεδιαστές που εξετάζουν τα θαλάσσια αυτά έργα είναι τα κάτωθι :

- IEC 60079. Το πρότυπο της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής για τις εκρηκτικές ατμόσφαιρες που περιλαμβάνει επικίνδυνες περιοχές και πρότυπα ανίχνευσης αερίου που ισχύουν και για το υδρογόνο (IEC, 2020) .
- IEC 61892. Το πρότυπο της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής για κινητές και σταθερές υπεράκτιες μονάδες που περιλαμβάνει διατάξεις εξαερισμού για το υδρογόνο που παράγεται από μπαταρίες (IEC, 2021).

- ISO 11114. Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης Κύλινδρων Αερίου που περιλαμβάνει συμβουλές σχετικά με συμβατά υλικά και τις μεθόδους δοκιμής για την επιλογή χάλυβα ανθεκτικού στο υδρογόνο (ISO, 2020).

Μετά την υιοθέτηση του κανονισμού EU MRV, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας δημιούργησε ένα σύστημα συλλογής δεδομένων. Το σύστημα απαιτεί από τους ιδιοκτήτες μεγάλων πλοίων (μεγαλύτερης χωρητικότητας 5000 τόνων) που ασχολούνται με την διεθνή ναυτιλία να αναφέρουν πληροφορίες σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου των πλοίων τους στα κράτη σημαίας αυτών των πλοίων. Στη συνέχεια, τα κράτη σημαίας αναφέρουν συγκεντρωτικά δεδομένα στον οργανισμό, ο οποίος συντάσσει ετήσια συνοπτική έκθεση στην Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος.

Το σύστημα του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας τέθηκε σε ισχύ τον Μάρτιο του 2018 και η συλλογή δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου ξεκίνησε την 1η Ιανουαρίου 2019. Ως αποτέλεσμα, από το 2019, τα πλοία που καταπλέουν σε λιμάνια του ΕΟΧ θα πρέπει να υποβάλλουν αναφορά τόσο βάσει του κανονισμού ΕΕ για το MRV όσο και του συστήματος συλλογής δεδομένων του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας.

Ο κανονισμός ΕΕ MRV Search for available translations of the preceding (άρθρο 22) προβλέπει ότι η Επιτροπή θα πρέπει, σε περίπτωση διεθνούς συμφωνίας για ένα παγκόσμιο σύστημα MRV για τις εκπομπές ναυτιλίας, να επανεξετάσει τον κανονισμό και, εάν χρειάζεται, να προτείνει τροποποιήσεις για να διασφαλίσει την ευθυγράμμιση με αυτήν διεθνή συμφωνία. Τον Φεβρουάριο του 2019, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπέβαλε πρόταση για την τροποποίηση του κανονισμού ΕΕ MRV προκειμένου να ληφθεί υπόψη το παγκόσμιο σύστημα συλλογής δεδομένων.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή συνείσφερε 10 εκατομμύρια ευρώ για την ενεργειακή απόδοση. Στο πλαίσιο του 4ετούς έργου, έχουν δημιουργηθεί Κέντρα Συνεργασίας Ναυτιλιακής Τεχνολογίας σε 5 περιοχές: Αφρική, Ασία, Καραϊβική, Λατινική Αμερική και Ειρηνικό. Μέσω της τεχνικής βοήθειας και της ανάπτυξης ικανοτήτων, τα κέντρα θα προωθήσουν την υιοθέτηση τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα και λειτουργίες στις θαλάσσιες μεταφορές σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες. Αυτό θα υποστηρίξει επίσης την εφαρμογή των διεθνώς συμφωνημένων κανόνων και προτύπων ενεργειακής απόδοσης των πλοίων (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019).

3.3. Κανόνες ABS για το υδρογόνο

Οι υπάρχοντες κανόνες για τα κύτταρα καυσίμου περιλαμβάνουν τον οδηγό για τα συστήματα ισχύος καυσίμου για εφαρμογές θαλάσσιων και υπεράκτιων κινητήρων , που χρησιμοποιούνται από σκάφη που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλών εκπομπών ρύπων (ABS, 2020). Ο οδηγός συστημάτων ισχύος καυσίμου υιοθετεί τις προσωρινές οδηγίες του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας για την ασφάλεια των πλοίων, χρησιμοποιώντας εγκαταστάσεις τροφοδοσίας κυψελών καυσίμου. Ο οδηγός κυψελών καυσίμου επικεντρώνεται κυρίως στις απαιτήσεις του σχεδιασμού των κυψελών καυσίμου, αλλά περιλαμβάνει επίσης αναφορές για το υδρογόνο ως καύσιμο, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος συγκράτησης καυσίμου, των υλικών και των συστημάτων των σωληνώσεων, της πυρασφάλειας, των ηλεκτρικών συστημάτων και των συστημάτων ελέγχου, παρακολούθησης και ασφάλειας (ABS, 2020). Μέρη αυτού του οδηγού , ειδικά για τα συστήματα αποθήκευσης και τροφοδοσίας του υδρογόνου, ενδέχεται επίσης να εφαρμοστούν σε κινητήρες εσωτερικής καύσης που θα χρησιμοποιούν υδρογόνο. Ορισμένα συστήματα, εξοπλισμός ή εξαρτήματα ενδέχεται να πρέπει να πιστοποιηθούν σύμφωνα με το πρόγραμμα έγκρισης σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο βαθμίδας για να επιβεβαιώσουν την ασφαλή κατασκευή τους, τις κατάλληλες δοκιμές και την ορθή εγκατάσταση τους (ABS, 2021).

3.4 Κώδικες IGF και IGC

Ο IGF (Διεθνής Κώδικας Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν Αέρια ή άλλα Καύσιμα Χαμηλού Σημείου Ανάφλεξης) και IGC (Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό Πλοίων που Μεταφέρουν Υγροποιημένα Αέρια Χύδη) είναι δύο σημαντικοί κώδικες που αναπτύχθηκαν από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) για διασφαλίζει την ασφάλεια των πλοίων που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης και των πλοίων που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια χύμα, αντίστοιχα (IMO, 2016).

Ο κώδικας IGF παρέχει μέτρα ασφαλείας για πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης, όπως υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) και υδρογόνο. Καλύπτει το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση τέτοιων πλοίων, καθώς και τον εξοπλισμό ασφαλείας και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.

Ο κώδικας IGC, από την άλλη πλευρά, προβλέπει μέτρα ασφαλείας για πλοία που μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια χύμα, όπως υγραέριο (LPG), υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και αιθυλένιο. Καλύπτει το σχεδιασμό, την κατασκευή και τον εξοπλισμό τέτοιων πλοίων, καθώς και τις διαδικασίες ασφαλείας που πρέπει να ακολουθούνται κατά τη φόρτωση, εκφόρτωση και μεταφορά υγροποιημένων αερίων χύμα (IMO, 2016).

Και οι δύο κώδικες είναι απαραίτητοι για τη διασφάλιση της ασφάλειας των πλοίων και του πληρώματος τους, καθώς και για την προστασία του περιβάλλοντος από πιθανούς κινδύνους.

Κεφάλαιο 4ο :Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση της χρήσης υδρογόνου ως καυσίμου στα νεότευκτα και υπάρχοντα πλοία

Το υδρογόνο κερδίζει έδαφος ως καύσιμο για τα πλοία λόγω της δυνατότητάς του να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να βελτιώσει την ποιότητα του αέρα. Μια τεχνοοικονομική αξιολόγηση της χρήσης του υδρογόνου ως καυσίμου σε νέα και υπάρχοντα πλοία συνεπάγεται την αξιολόγηση της τεχνικής σκοπιμότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας της χρήσης υδρογόνου ως πηγής καυσίμου.

Από τεχνική άποψη, η χρήση υδρογόνου στα πλοία απαιτεί την ανάπτυξη κατάλληλων κυψελών καυσίμου, συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου και υποδομής παροχής υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν το υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτήσει το σύστημα πρόωσης του πλοίου. Η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης και η δημιουργία υποδομής παροχής υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία υιοθέτηση του υδρογόνου ως καυσίμου για πλοία (EMSA, 2021).

Από οικονομική άποψη, η χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου για τα πλοία αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις, όπως το υψηλό κόστος παραγωγής υδρογόνου, η έλλειψη ευρέως διαδεδομένης υποδομής εφοδιασμού υδρογόνου και η έλλειψη μιας ώριμης αγοράς για καύσιμα υδρογόνου. Το υψηλό κόστος παραγωγής υδρογόνου μπορεί να μειωθεί μέσω της ανάπτυξης πιο αποτελεσματικών μεθόδων παραγωγής και της κλιμάκωσης της παραγωγής για να αυξηθούν οι οικονομίες κλίμακας. Η δημιουργία υποδομής εφοδιασμού υδρογόνου και η δημιουργία μιας ώριμης αγοράς καυσίμων υδρογόνου μπορεί να μειώσει το κόστος του υδρογόνου και να το καταστήσει πιο οικονομικά βιώσιμο ως καύσιμο για πλοία.

Εκτός από τις τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις, η χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου για τα πλοία απαιτεί επίσης σημαντικές επενδύσεις στην έρευνα και ανάπτυξη για την προώθηση της τεχνολογίας και τη μείωση του κόστους παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου. Οι κυβερνήσεις μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη της ανάπτυξης τεχνολογίας καυσίμου υδρογόνου παρέχοντας χρηματοδότηση για έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και με τη θέσπιση πολιτικών για την ενθάρρυνση της υιοθέτησης του υδρογόνου ως καυσίμου για πλοία (IMO, 2020).

Συμπερασματικά, η χρήση υδρογόνου ως καυσίμου σε νέα και υπάρχοντα πλοία είναι μια πολλά υποσχόμενη εξέλιξη που έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να βελτιώσει την ποιότητα του αέρα. Ωστόσο, η ευρεία υιοθέτηση του υδρογόνου ως καυσίμου για τα πλοία απαιτεί την επίλυση τεχνικών και οικονομικών προκλήσεων, καθώς και σημαντικές επενδύσεις στην έρευνα και ανάπτυξη.

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν το κόστος εγκατάστασης και το κόστος συντήρησης που απαιτούνται για τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας των πλοίων, όπως αυτή του υδρογόνου. Τέλος, θα γίνει σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες πλοίων.

4.1. Κόστος εγκατάστασης (μετασκευή & νέα)

Με βάση μια συνέντευξη που διεξήχθη από τους Florentinus et al. (2012), είναι επί του παρόντος δύσκολο για τους αντίστοιχους μετόχους της αγοράς να εκτιμήσουν το πραγματικό επενδυτικό κόστος καθώς αυτό εξαρτάται από το μέγεθος, τη διαθεσιμότητα και την ωριμότητα της αγοράς. Για τους πλοιοκτήτες, οι πιο ελκυστικές επενδύσεις είναι αυτές που εξοικονομούν σημαντικό ποσό λειτουργικού κόστους. Συχνά με βάση χαμηλότερες τιμές καυσίμων ή άλλα κίνητρα, το επενδυτικό κόστος αποσβένεται σε σύντομο χρονικό διάστημα (η ζωή του σκάφους μπορεί να υπερβεί τα 50 χρόνια) (Florentinus et al., 2012).

Το επενδυτικό κόστος εκφράζεται ως κεφαλαιουχικό κόστος της πρόωσης και της σχετικής ενσωματωμένης υποδομής ανά εγκατεστημένη χωρητικότητα κινητήρα, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών για εποχιακούς κινητήρες, δεξαμενές καυσίμων, σωληνώσεις, συστήματα αερίου και επεξεργαστές καυσίμου κ.λπ. (Hansson et al., 2019). Η αλλαγή του τύπου της πηγής ενέργειας απαιτεί μετασκευή των υπάρχοντων πλοίων ή κατασκευή νέων. Το κεφαλαιουχικό κόστος κάθε εναλλακτικής πηγής ενέργειας αναφέρεται στο συνολικό κόστος ναυπήγησης ή μετασκευής παλαιών πλοίων σε νέες εναλλακτικές πηγές ενέργειας (Ren & Lützen, 2017). Με βάση την μακροοικονομική άποψη και την άποψη της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού, οι χερσαίες υποδομές και οι εγκαταστάσεις παραγωγής καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα αντιπροσώπευαν το μεγαλύτερο μερίδιο των

επενδύσεων, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 87% της συνολικής επένδυσης (Krantz et al., 2020).

Κόστος Μετατροπής

Το κόστος μετατροπής περιλαμβάνει υπάρχουσες υποστηρικτικές εγκαταστάσεις συμβατές με τα αντίστοιχα εναλλακτικά καύσιμα και το υδρογόνο, όπως η δομική μετατροπή πλοίων μεταφοράς LNG. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους ίδιους τους κατασκευαστές, το πρόσθετο κόστος που σχετίζεται με τις τροποποιήσεις πλοίων αφορά κυρίως την υποδομή κινητήρων της FAME, η οποία είναι μικρότερη από το 5% του κόστους του κινητήρα. Όσον αφορά στο υδρογόνο, υπάρχει πρόσθετο κόστος αναφοράς κατά τη μετατροπή, ειδικά όταν χρησιμοποιείται προηγμένο υδρογόνο. Κάθε πρόσθετο κόστος που σχετίζεται με τη χρήση υδρογόνου είναι πολύ υψηλότερο σε σχέση με το LNG, λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών αποθήκευσης, της υψηλότερης ποιότητας μόνωσης και των λιγότερων εφαρμογών στη θάλασσα (DNV GL, 2019a)

Κόστος παραγγελίας σε νεότευκτα πλοία

Στα νεότευκτα πραγματοποιείται μια αλλαγή στον συνδυασμό τεχνολογίας (κινητήρες και καύσιμα) όταν αγοράζεται ένα νέο σκάφος και ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους και τη λειτουργική διαχείριση. Τα μηχανήματα για την επεξεργασία υδρογόνου απαιτούν σημαντικές επενδύσεις. Ως εκ τούτου, η χρηματοδότηση είναι ένα από τα βασικά στοιχεία για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας της επένδυσης (Tsita & Pilavachi, 2013). Ενώ οι πιο αποτελεσματικοί φορείς εκμετάλλευσης πλοίων μπορούν να εξοικονομήσουν μακροπρόθεσμες δαπάνες, το βραχυπρόθεσμο κόστος μπορεί να είναι πολύ υψηλό, ειδικά για τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων στις αναπτυσσόμενες χώρες. Σε αυτά τα κράτη επιτράπη να παραιτηθούν από τη συμμόρφωση με τα μέτρα των Ηνωμένων Εθνών το 2019, επειδή ορισμένοι παράγοντες καθιστούσαν δύσκολη την τήρηση των ρυθμιστικών προτύπων (Teeter and Cleary, 2014).

Το συνολικό κόστος αρχικής επένδυσης (IPC) είναι μια σημαντική παράμετρος κόστους που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της σκοπιμότητας επένδυσης σε μηχανικό εξοπλισμό πρόωσης με κυψέλες καυσίμου, είτε πρόκειται για σκάφος νέας

κατασκευής είτε για υπάρχον σκάφος που μελετάται για μετατροπή σε πλοίο μηδενικής εκπομπής άνθρακα.

Αποτελείται από δύο κύριες συνιστώσες κόστους:

- 1) το κόστος του κύριου συστήματος πρόωσης (ΑΚΕΠρ.) και
- 2) το κόστος του συστήματος αποθήκευσης καυσίμων (ΑΚΕΑποθ.), το οποίο υπολογίζεται ως εξής : $ΑΚΕΟλικό = ΑΚΕΠρ. + ΑΚΕΑποθ.$
- (3) Το κόστος συστημάτων πρόωσης (ΑΚΕΠρ.), εκφράζεται σε \$ ανά kW εγκατεστημένης ισχύος (\$/kW), ενώ το κόστος των συστημάτων αποθήκευσης καυσίμων σε \$ ανά kg αποθηκευμένου καυσίμου (\$/kg) (Raucci, 2017).

Επομένως, το συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης αποτελεί το εκτιμώμενο «μοναδιαίο κόστος προμήθειας συστήματος». Σε γενικές γραμμές, το κόστος του εξοπλισμού θαλάσσιας μηχανικής πρόωσης και τροφοδοσίας εξαρτάται από το κόστος των εξαρτημάτων και το μέγεθός τους. Ωστόσο, δεδομένου ότι αναπτύσσεται η υποδομή μαζικής παραγωγής για νέες τεχνολογίες, όπως συστήματα κυψελών καυσίμου και συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου, το κόστος της μηχανικής επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες. Πρόκειται για την εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή, το εκτιμώμενο σχήμα της «καμπύλης μάθησης» (S-curve) και δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης (R&D) που σχετίζονται με την ανάπτυξη και τη διαθεσιμότητα των προαναφερθέντων προϊόντων. Πολλές μελέτες έχουν εξετάσει εκτιμήσεις σχηματισμού κόστους για κυψέλες καυσίμου σε άλλες εφαρμογές όπως τα αυτοκίνητα, και λιγότερη έμφαση έχει δοθεί στις εκτιμήσεις των συστημάτων κυψελών καυσίμου σε θαλάσσιες εφαρμογές (ABB, 2013).

Δυστυχώς, υπάρχουν λίγες πληροφορίες σχετικά με το κόστος των κυψελών καυσίμου των πλοίων στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Η εστίαση μέχρι στιγμής έχει δοθεί κυρίως στη χρήση συστημάτων κυψελών καυσίμου ως «βοηθητικών κινητήρων», και καθαρά για σκοπούς πρόωσης καθώς οι υψηλές απαιτήσεις ισχύος προϋποθέτουν ένα σύστημα κυψελών καυσίμου της τάξης των 5 MW, το οποίο σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα δεν αποτελεί εξελιγμένη και ποιοτική τεχνολογία. Αν και η απαίτηση για κινητήρες υψηλότερης ισχύος στα πλοία μπορεί να μειώσει το κόστος ανά κιλοβάτ εγκατεστημένης ισχύος, πρέπει να σημειωθεί ότι η τάση μείωσης του κόστους των κινητήρων κυψελών καυσίμου των πλοίων μπορεί να

διαφέρει από εκείνη των αντίστοιχων οχημάτων, καθώς είναι σαφές ότι δεν μπορούν να παράγονται στην ίδια κλίμακα όγκου παραγωγής (Han, et al., 2012).

Το κόστος των συστημάτων κυψελών καυσίμου θαλάσσης ποικίλλει ανάλογα με το συγκεκριμένο σύστημα, αλλά γενικά κυμαίνεται από 5.000 έως 10.000 \$ ανά κιλοβάτ. Αυτό το κόστος είναι σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα που κινούνται με ντίζελ, αλλά τα οφέλη των κυψελών καυσίμου, όπως οι μειωμένες εκπομπές και η αυξημένη απόδοση, τα καθιστούν επιθυμητή επένδυση για πολλούς ναυτιλιακούς φορείς. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται και η ζήτηση αυξάνεται, το κόστος των συστημάτων κυψελών καυσίμου πλοίων αναμένεται να μειωθεί. Επιπλέον, μπορεί επίσης να διατίθενται κρατικά κίνητρα και επιδοτήσεις για να αντισταθμιστεί το αρχικό κόστος. Τελικά, η απόφαση για επένδυση σε ένα σύστημα κυψελών καυσίμου θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ειδικών αναγκών και του προϋπολογισμού του χειριστή (Ballard Power Systems, 2020).

Το δεύτερο στοιχείο του ΑΚΕΟλικό είναι το κόστος του συστήματος αποθήκευσης καυσίμου (ΑΚΕΑποθ.). Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, δεδομένου ότι το κόστος ενός συστήματος αποθήκευσης υγρού υδρογόνου εκφράζεται σε \$/kg, θα πρέπει να μετατραπεί σε \$/kW εγκατεστημένης ισχύος. Το κόστος μονάδας αποθήκευσης καυσίμου (FSC) (σε \$/kg) για την τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, αλλά κυρίως εξαρτάται από τον τύπο της τεχνολογίας αποθήκευσης. Οι επιλογές του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου χωρίζονται σε: συμπιεσμένο υδρογόνο, υγρό υδρογόνο και αποθήκευση στερεού υδρογόνου. Σύμφωνα με έκθεση του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, το κόστος παραγωγής και παράδοσης υγρού υδρογόνου εκτιμήθηκε σε περίπου 16 \$ ανά κιλό το 2020, με εύρος κόστους από 4 έως 30 \$ ανά κιλό, ανάλογα με την τοποθεσία και τη μέθοδο παραγωγής. Ωστόσο, το κόστος αναμένεται να μειωθεί καθώς βελτιώνεται η τεχνολογία και αυξάνεται η ζήτηση για υδρογόνο (NREL, 2020).

Έχει προταθεί ότι η αποθήκευση υγρού υδρογόνου μπορεί να είναι πιο οικονομική ως εναλλακτική τεχνολογία αποθήκευσης. Αυτός ο ισχυρισμός βασίζεται σε μελέτες που δείχνουν ότι η υψηλότερη χωρητικότητα αποθήκευσης κοστίζει λιγότερο ανά μονάδα από τις μικρότερες χωρητικότητες. Μπορεί να είναι δύσκολο να εκτιμηθεί με ακρίβεια το κόστος αποθήκευσης διαφορετικών υλικών λόγω της μικρής έρευνας που

γίνεται για αυτό το θέμα. Το κόστος αποθήκευσης υγρού υδρογόνου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η μέθοδος παραγωγής, η μεταφορά και η τεχνολογία αποθήκευσης που χρησιμοποιείται. Επί του παρόντος, το κόστος αποθήκευσης υγρού υδρογόνου κυμαίνεται από 4 έως 10 \$ ανά κιλό. Ωστόσο, με τις εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης και αυξημένη αποδοτικότητα παραγωγής, το κόστος αναμένεται να μειωθεί στο μέλλον (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

4.2. Κόστος λειτουργίας (συντήρηση & κατανάλωση καυσίμου)

Οι πλοιοκτήτες υπολογίζουν το OPEX με βάση 365 εργάσιμες ημέρες το χρόνο, είτε το πλοίο είναι ναυλωμένο είτε όχι. Όταν ένα πλοίο είναι εκτός λειτουργίας, οι ναυλωτές δεν πληρώνουν ενοικίαση ναύλωσης, επομένως τα ναυτιλιακά έσοδα μειώνονται (Kavussanos & Visvikis, 2016). Συγκεκριμένα, το λειτουργικό κόστος αναφέρεται στους μισθούς του πληρώματος, στην εκπαίδευση του πληρώματος, στο κόστος ασφάλισης και λειτουργίας (κόστος συντήρησης και ενέργειας) (Hansson et al., 2019).

Κόστος Συντήρησης και Επισκευής

Τα συστήματα εναλλακτικής ενέργειας απαιτούν υποστηρικτικά μηχανήματα και υποδομές. Αυτό σημαίνει σημαντικό κόστος συντήρησης, επισκευής και αντικατάστασης αυτών των συστημάτων. Τα κόστη που σχετίζονται με αυτές τις διαδικασίες ισχύουν επίσης για υποδομές εναλλακτικής ενέργειας, όπως είναι αυτές του υδρογόνου (Ren & Lützen, 2017).

Κατά την επιλογή του μηχανολογικού εξοπλισμού ενός πλοίου, λαμβάνεται επιπλέον υπόψη το αρχικό κόστος επένδυσης (ΑΚΕ). Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη τα έξοδα συντήρησης για τον εξοπλισμό κυψελών καυσίμου και εκφράζεται ως \$/kW ανά έτος ή \$/(kW*yr). Το κόστος συντήρησης για εξοπλισμό κυψελών καυσίμου μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με διάφορους παράγοντες όπως το μέγεθος, η χωρητικότητα και η χρήση. Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη (IEA Clean Energy Progress Report 2019, σελίδα 47), τα συστήματα κυψελών καυσίμου απαιτούν ετήσιο κόστος συντήρησης περίπου 50 έως 200 \$ ανά κιλοβάτ. Στην περίπτωση των

σκαφών, το κόστος συντήρησης για τον εξοπλισμό κυψελών καυσίμου μπορεί να κυμαίνεται από \$100 έως \$200 ανά κιλό ετησίως (Koudelka et al., 2019).

Ενεργειακό κόστος

Η DNV GL συνέκρινε το κόστος των καυσίμων χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις πηγές που χρησιμοποίησε και μετέτρεψε τις πληροφορίες σε αξία δολαρίου ανά μεγαβατώρα. Αυτό της επέτρεψε να συγκρίνει το κόστος διαφορετικών καυσίμων (όπως φυσικό αέριο και άνθρακα) (DNV GL, 2019a).

Από μελέτες που έχουν διεξαχθεί τα τελευταία χρόνια είναι σαφές ότι το υδρογόνο είναι αρκετά αποδοτικό αλλά συνάμα πολύ ακριβό και το μεγάλο εύρος κόστους υποδηλώνει σημαντική αβεβαιότητα όσον αφορά την τιμολόγηση. Βάση των δεδομένων των τρεχόντων σχεδίων και της τυπικής ταχύτητας ανάπτυξης τους , η DNV GL δεν προβλέπει καμία σημαντική κίνηση προς τα βιοκαύσιμα και ειδικότερο προς το υδρογόνο έως το 2025-2030, κρίνοντας ότι ίσως αργότερα, να καταστεί αναγκαία η στροφή σε αυτή την πηγή ενέργειας. (DNV GL, 2019a). Αναλυτικότερα θα μελετηθεί το ενεργειακό κόστος σε συσχέτιση με την κατανάλωση καυσίμου στην επόμενη ενότητα.

4.3. Σύγκριση με συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες πλοίων

Σε αυτή την ενότητα, θα συγκρίνουμε την απόδοση και το κόστος χρήσης δίχρονων ή τετράχρονων κινητήρων εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με συμβατικά καύσιμα, όπως το μαζούτ ή το ντίζελ πλοίων, σε σύγκριση με την τρέχουσα κατάσταση στη ναυτιλία. Θα αναφερθούμε στις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, επειδή αυτά τα συστήματα προσφέρουν μια ποικιλία πλεονεκτημάτων σε σχέση με τους παραδοσιακούς κινητήρες και καύσιμα βενζίνης και ντίζελ.

Καθένας από τους συνδυασμούς τεχνολογιών και οικονομιών παράγει διαφορετικά αποτελέσματα, ανάλογα με έναν αριθμό υποθέσεων. Ένα σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να ανταποκρίνεται στις ειδικές ανάγκες του τύπου του συστήματος αποθήκευσης. Οι ερευνητές λένε ότι είναι δύσκολο να διατυπωθούν αξιόπιστες υποθέσεις για κάτι χωρίς να υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία. Το κόστος των συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου για πλοία στο μέλλον θα είναι

υψηλό. Αν και αυτές οι παραδοχές μπορούν να θεωρηθούν ασταθείς, η ανάλυση που ακολουθεί εκτιμάται ότι είναι αρκετά αντιπροσωπευτική (Smith et al., 2013).

Η Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (ΕΚΚ) ορίζεται από τον τύπο:

$$ΕΚΚ = n \cdot \delta \quad (1)$$

όπου n είναι η επί % απόδοση της μηχανής και δ είναι η ενεργειακή πυκνότητα του καυσίμου που χρησιμοποιείται, σε kWh/kg (Raucci, 2017).

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου περιλαμβάνει την απόδοση του κινητήρα σε συνδυασμό με το καύσιμο που χρησιμοποιείται και επομένως αποτελεί σημαντική παράμετρο για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Οι σημερινοί συμβατικοί κινητήρες θαλάσσιας πρόωσης έχουν συνήθως απόδοση περίπου 40-45%. Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη του Διεθνούς Συμβουλίου για τις Καθαρές Μεταφορές (ICCT) (2021), οι σύγχρονοι πετρελαιοκινητήρες μεσαίας ταχύτητας έχουν μέση απόδοση 44%, ενώ οι πετρελαιοκινητήρες χαμηλής ταχύτητας έχουν απόδοση περίπου 41%. Αυτά τα στοιχεία έχουν βελτιωθεί με την πάροδο του χρόνου, με τους παλαιότερους κινητήρες να έχουν χαμηλότερη απόδοση περίπου 30-35% (Barrios et al., 2022).

Η ηλεκτρική απόδοση των συστημάτων κυψελών καυσίμου θεωρήθηκε ότι ήταν η ίδια ανεξάρτητα από το πόση ισχύ παρήγαγαν οι κυψέλες. Αν θεωρηθεί ότι υπάρχει ένας ηλεκτροκινητήρας και μια κυψέλη καυσίμου, λαμβάνεται υπόψη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια για πρόωση. Δεδομένου ότι ο ηλεκτροκινητήρας είναι 95% αποδοτικός, οι κυψέλες καυσίμου πρέπει να είναι τουλάχιστον 95% αποδοτικές για την πλήρη χρήση του. Ωστόσο, σε συνδυασμό με τον ηλεκτροκινητήρα, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να είναι έως και 52% αποδοτικές. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν Κυψέλες Καυσίμου με υδρογονάνθρακες, όπως το πετρέλαιο ή η βενζίνη. Το LNG μπορεί συχνά να απαιτεί έναν αναμορφωτή καυσίμου για να είναι αποτελεσματικό. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να ληφθεί υπόψη η απόδοση του αναμορφωτή καυσίμου. Γενικά, η απόδοση των κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με έναν αναμορφωτή είναι χαμηλότερη όταν χρησιμοποιείται η λειτουργία μερικού φορτίου, λόγω των θερμικών και άλλων απωλειών του αναμορφωτή. Θεωρήθηκε ότι η απόδοση του αναμορφωτή στα πλοία είναι περίπου 70%, επομένως η αντίστοιχη απόδοση του συστήματος "Κυψέλη καυσίμου με ηλεκτρικό κινητήρα" είναι περίπου 37% (Argyros et al, 2014).

Η ενεργειακή πυκνότητα του καθαρού υδρογόνου είναι περίπου 39,5 kWh/kg, ενώ η ενεργειακή πυκνότητα του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) είναι περίπου 55,5 kWh/kg (El-Sayed, 2020). Άρα, η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC) καθαρού υδρογόνου ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής και τον τύπο του κινητήρα στον οποίο χρησιμοποιείται. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, το SFC των οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου κυμαίνεται από 0,75 έως 1,5 kg υδρογόνου ανά κιλοβάτ-ώρα (kWh) εξόδου ενέργειας (Li, 2018). Το SFC του υγραερίου (LPG) ποικίλλει επίσης ανάλογα με τον κινητήρα στον οποίο χρησιμοποιείται, αλλά είναι συνήθως μεταξύ 250 και 450 γραμμάρια ανά kWh (Erdoğan & Ünal, 2019).

Η αποθήκευση του υδρογόνου σε υγρή μορφή απαιτεί ειδικό σύστημα ψύξης, το οποίο εξαρτάται από την απόδοση της μόνωσης. Το κόστος των συγκεκριμένων παραμέτρων αποθήκευσης υδρογόνου δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Αυτό θα πρέπει να γίνει προκειμένου να καθοριστεί ακριβώς πόση ενέργεια χρειάζεται για να παραχθεί το συγκεκριμένο καύσιμο. Θεωρήθηκε ότι ο τρόπος αποθήκευσης υγρού υδρογόνου στο πλοίο είναι τέτοιος ώστε οι απώλειες ενέργειας να ελαχιστοποιούνται και να έχουν αμελητέα επίδραση στον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου (Argyros et al, 2014).

Η απώλεια εκτοπίσματος είναι επίσης σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των συστημάτων αποθήκευσης εναλλακτικών καυσίμων στην αναμενόμενη απώλεια της μεταφορικής ικανότητας των πλοίων. Τα εναλλακτικά καύσιμα έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και καταλαμβάνουν περισσότερο αποθηκευτικό χώρο, γεγονός που συμβάλλει στην προαναφερθείσα απώλεια χωρητικότητας μετατόπισης. Στην περίπτωση του καυσίμου του υδρογόνου, απαιτείται υψηλότερη ισχύς επί του σκάφους για τα πλοία με κυψέλες καυσίμου, αλλά ο όγκος και το βάρος του συστήματος καυσίμου αυξάνονται σημαντικά σε σύγκριση με την απαιτούμενη ισχύ επί του σκάφους, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η πυκνότητα ισχύος των μελλοντικών θαλάσσιων συστημάτων κυψελών καυσίμου.

Παρόλο που το καύσιμο του υδρογόνου απαιτεί περισσότερη ισχύ επί του σκάφους όταν συνδυάζεται με κυψέλες καυσίμου, ο όγκος και το βάρος του συστήματος καυσίμου αυξάνονται σημαντικά σε σύγκριση με την απαιτούμενη ισχύ επί του σκάφους, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η πυκνότητα ισχύος των μελλοντικών θαλάσσιων συστημάτων κυψελών καυσίμου. Αν και δεν υπάρχει βιβλιογραφία

σχετικά με την πυκνότητα ισχύος των μεγάλων κυψελών καυσίμου ,θα είναι ενδιαφέρον να δούμε πώς οι κατασκευαστές θα ανταποκριθούν σε αυτό το ζήτημα , καθώς ο σχεδιασμός μπορεί να απαιτεί την εγκατάσταση των κυψελών καυσίμου σε διαφορετικές θέσεις για την εξοικονόμηση χώρου.

Καθώς η ογκομετρική πυκνότητα των συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου είναι πολύ χαμηλή, θεωρείται ότι τα συστήματα αποθήκευσης καυσίμου έχουν καθοριστική επίδραση στην απώλεια της ικανότητας εκτόπισης. Για να υπολογιστεί η απώλεια ικανότητας μετατόπισης, διενεργούνται οι ακόλουθοι υπολογισμοί (Shilpa & Anurag, 2015).

- (i) Υπολογίζεται ο όγκος (ανά kWh) που δεσμεύεται από το σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου (VH₂) το οποίο παρέχει την ενέργεια που απαιτείται για τον ανεφοδιασμό του σκάφους.

Ο υπολογισμός απαιτεί την πυκνότητα χύδην (dH₂,kg/m³)(υπό ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης) και την ενεργειακή πυκνότητα (δH₂,kWh/kg) του υγρού υδρογόνου. Επομένως : VH₂ = 1/(dH₂ × δH₂) σε m³ /kWh

- (ii) Υπολογίζεται ότι ο όγκος πλήρωσης (ανά kWh) των συμβατικών δεξαμενών αποθήκευσης μαζούτ -HFO (VHFO) υπολογίζεται ως βάση για την εκτίμηση του πρόσθετου όγκου αποθήκευσης που απαιτείται για εναλλακτικά καύσιμα(π.χ. υγρό υδρογόνο).

Ο υπολογισμός απαιτεί την πυκνότητα όγκου (dHFO:kg/m³)(υπό ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας) και την ενεργειακή πυκνότητα (δHFO:kWh/kg) του μαζούτ. Επομένως : VHFO = 1/ (dHFO × δHFO) σε m³ /kWh

- iii) Υποθέτοντας μια απώλεια μετατόπισης 0,8 τόνων (0,8*tn) για κάθε κυβικό μέτρο (m³) αποθήκευσης καυσίμου, η παράμετρος AXE(σε τόνους / kWh) ορίζεται από τον τύπο: AXE = (VH₂ – VHFO) × 0,8 (2)

Στην παρούσα αξιολόγηση, θεωρήθηκε ότι οι απαιτήσεις ισχύος και ενέργειας ενός πλοίου με καύσιμο υγρό υδρογόνο ή υγροποιημένο φυσικό αέριο στη θάλασσα είναι ίδιες με εκείνες ενός πλοίου αναφοράς με καύσιμο μαζούτ . Υπολογίστηκε ότι η AXE για το υγρό καύσιμο του υδρογόνου είναι 0,52τόνοι/MWh και 0,06τόνοι/MWh για το καύσιμο ΥΦΑ.

Συμπέρασμα

Η υπερθέρμανση του πλανήτη από τη ναυτιλία δεν προστατεύεται από ειδικές νομοθετικές διατάξεις . Η ρύπανση αυτή είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά , καθώς οι τεχνολογικές και επιχειρησιακές βελτιώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μειώσεις ρυπογόνων εκπομπών . Ενώ υπάρχουν μέτρα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν γρήγορα και εύκολα και να δημιουργήσουν άμεσες μειώσεις των εκπομπών, η ναυτιλιακή βιομηχανία αδρανής όσον αφορά την αντιμετώπιση των ρυπογόνων εκπομπών, οι οποίες αποτελούν μια από τις βασικότερες αιτίες της κλιματικής αλλαγής.

Ερευνώντας τη φύση της πράσινης ναυτιλίας, ειδικά την χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτικού καυσίμου των πλοίων, εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα: Η κλιματική αλλαγή έχει προκαλέσει μια σειρά από ανακατατάξεις και προσαρμογές στις διεθνείς αγορές, με την ευρωπαϊκή σειρά συστημάτων και κανονισμών να έχουν δρομολογηθεί και να συμπορεύονται με τα διεθνή δεδομένα . Οι παράγοντες που θα συμβάλουν στην απελευθέρωση του ναυτιλιακού κλάδου βασίζονται κυρίως στους τέσσερις πυλώνες (περιβαλλοντικό, τεχνοτεχνικό πλαίσιο, κοινωνικοπολιτικό και οικονομικό) και υπόκεινται σε μια σύνθεση των πολυδιάστατων παραγόντων τους.

Για παράδειγμα, η περιβαλλοντική και η τεχνολογική ανάπτυξη δεν μπορούν πάντα να συμβαδίζουν για την επίτευξη της βιωσιμότητας , καθώς τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς φαίνονται να είναι βιώσιμα «με την πρώτη ματιά», αλλά στις ποσότητες που χρειάζονται για να καλύψουν τις ανάγκες της ναυτιλιακής αγοράς, θα είναι επιβλαβή για την γη και την θάλασσα, ενώ θα αποσταθεροποιήσουν τον κύκλο ζωής του άνθρακα.

Οι επίσημοι διεθνείς, ευρωπαϊκοί και εθνικοί θεσμοθέτες (EC, IMO, RED I & II, ISO, κλπ), έχοντας τα αντίστοιχα εργαλεία όπως τις ΟΔΗΓΙΕΣ, τα MRV, SEEMP, EEDI, τα πρότυπα ασφαλείας κ.ο.κ. , συνεργάζονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα δίκτυο προστασίας και βιώσιμης ανάπτυξης των εν λόγω καυσίμων και ειδικότερα του υδρογόνου, το οποίο αποτέλεσε και αντικείμενο της παρούσας μελέτης .

Σχετικά πρόσφατα η ΕΕ ανακοίνωσε κάποια ανανεωμένα άρθρα, για την παρότρυνση ανάπτυξης των βιοκαυσίμων 2ης γενιάς και τον περιορισμό των 1ης γενιάς και ειδικότερα του περιβαλλοντικά ουδέτερου καυσίμου, του υδρογόνου (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019).

Όσον αφορά τις αναμενόμενες εξελίξεις, οι δοκιμές υδρογόνου έχουν ήδη ξεκινήσει σε μεγαλύτερα πλοία, με τα αποτελέσματα να είναι ενθαρρυντικά. Μέχρι το 2030, το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει ακόμη μεγαλύτερο ρόλο, εάν μπορεί να παραχθεί σε μεγάλες ποσότητες και ελκυστικές τιμές (DNV GL, 2019b). Το θετικό είναι ότι οι άμεσοι ενδιαφερόμενοι, όπως ναυλωτές, προμηθευτές καυσίμων και κινητήρων, ιδιοκτήτες φορτίου κ.λπ., έχουν δραστηριοποιηθεί σε αυτόν τον νέο κύκλο ανάπτυξης, αφουγγαζόμενοι τις απαιτήσεις της αγοράς, των πελατών και των καταναλωτών για πράσινες πρακτικές (Lun et al., 2016).

Εκτός από εκείνες τις λύσεις που προσφέρουν βραχυπρόθεσμες μειώσεις, θα πρέπει επίσης να εφαρμοστούν μακροπρόθεσμες λύσεις για να εξασφαλιστεί η συνεχιζόμενη μείωση της ρύπανσης από την ναυτιλία. Το θείο για παράδειγμα χρησιμοποιείται λόγω του χαμηλού κόστους του, που ανέρχεται περίπου τα \$ 550 ανά μετρικό τόνο. Ακόμα κι έτσι, η χρήση του παρουσιάζει προκλήσεις για τους χειριστές των πλοίων. Για παράδειγμα, τα υπολειμματικά καύσιμα πρέπει να θερμαίνονται σε περίπου 140 °C πριν χρησιμοποιηθεί. Η περιεκτικότητα σε θείο των υπολειμματικών καυσίμων ποικίλλει ανάλογα με το ακατέργαστο απόθεμα, αλλά παγκοσμίως υπολογίζεται περίπου στο 2,5%. Αντίθετα, τα καθαρότερα καύσιμα, όπως το θαλάσσιο πετρέλαιο που προέρχεται από τον «μαύρο χρυσό», περιέχουν 0,5% θείο, ενώ το θαλάσσιο πετρέλαιο που προέρχεται από το φυσικό αέριο περιέχει μόνο 0,1% θείο.

Η μετάβαση σε καύσιμα χαμηλών ρυπογόνων εκπομπών θα μείωνε τις εκπομπές λεπτών σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένου του μαύρου άνθρακα, καθώς και του διοξειδίου του άνθρακα και των οξειδίων του αζώτου. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός προβλέπει πως μια μετάβαση από το βαρύ θαλάσσιο πετρέλαιο ντίζελ σε βιοκαύσιμα /εναλλακτικά καύσιμα θα είχε ως αποτέλεσμα μείωση του διοξειδίου του άνθρακα 4-5% ανά μετρικό τόνο καταναλωμένων καυσίμων. Μια τέτοια αλλαγή στα καύσιμα θα μπορούσε επίσης να μειώσει το οξείδιο του αζώτου περισσότερο από 91%, τα σωματίδια κατά 63% και τα οξείδια αζώτου κατά σχεδόν 5%. Η μετάβαση σε καθαρά καύσιμα θα εξαλείψει επίσης την ανάγκη για καθαριστές, θέρμανση

δεξαμενών καυσίμου και λάσπης για καύση, η οποία θα μειώσει το κόστος για τους ιδιοκτήτες και τους φορείς εκμετάλλευσης. Ένα επιπλέον όφελος θα ήταν ότι η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την βελτίωση του υπολειμματικού πετρελαίου στο σκάφος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του πλοίου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μια τέτοια αλλαγή θα επέτρεπε επίσης τον έλεγχο των εκπομπών στο τέλος του σωλήνα, επιτρέποντας σημαντικές πρόσθετες μειώσεις εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ατμοσφαιρικών ρύπων που διαφορετικά δεν θα είναι πιθανό να επιτευχθούν.

Η εμπειρία δείχνει ότι η αλλαγή καυσίμου έχει νόημα. Ο εφοπλιστής της Maersk Line εφάρμοσε οικειοθελώς ένα πρόγραμμα αλλαγής καυσίμων για όλα τα πλοία του που ελλιμενίζονται στα λιμάνια της Καλιφόρνια. Περισσότερα από 60 πλοία της εταιρείας συμμετέχουν στο πρόγραμμα. Τα πλοία αλλάζουν τα καύσιμα στους κύριους κινητήρες τους 24 ναυτικά μίλια από το λιμάνι. Ένας εκπρόσωπος της Maersk ανέφερε ότι "η αλλαγή καυσίμου μπορεί να εφαρμοστεί πολύ γρήγορα, χωρίς την ανάγκη για επενδύσεις κεφαλαίου ή πρόσθετο εξοπλισμό". Σύμφωνα με αναφορές, αυτό το πρόγραμμα έχει ήδη μειώσει τις συνολικές εκπομπές κατά περίπου 400 μετρικούς τόνους ετησίως, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των σωματιδίων κατά 80 % και της μείωσης των οξειδίων του αζώτου.

Μερικοί υποστήριξαν ότι η μετάβαση σε καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο δεν αποτελεί αποτελεσματική συμβολή στην παγκόσμια αλλαγή του κλίματος. Ωστόσο, αυτά τα επιχειρήματα δεν λαμβάνουν υπόψη τα πολλά οφέλη από την αλλαγή των καυσίμων. Πρώτον, μεταξύ αυτών είναι το γεγονός ότι οι εκπομπές αντιμετωπίζονται ευκολότερα σε σταθερή τοποθεσία αντί επί του σκάφους. Επιπλέον, τα διυλιστήρια μπορούν στην πραγματικότητα να βελτιώσουν τα υπολειπόμενα έλαια και να εξαγάγουν το Sulphur που θα χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς, όπως για παράδειγμα ως πηγή γύψου που θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πρόσθετο όφελος μιας τέτοιας μετάβασης. Επιπλέον, η αλλαγή καυσίμου θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση των συνολικών εκπομπών ανά μετρικό χιλιόμετρο. Οποιοσδήποτε πρόσθετες εκπομπές που παράγονται στο διυλιστήριο θα αντισταθμιστούν πιθανώς από άλλους μηχανισμούς μείωσης των εκπομπών, όπως ο έλεγχος της ρύπανσης στο τέλος του σωλήνα, τεχνολογίες που είναι ήδη διαθέσιμες λόγω της απουσίας θείου στο καύσιμο. Οι μειώσεις του θείου επιτρέπουν τη χρήση τεχνολογικών ελέγχων που μπορούν να επιτύχουν πολύ

μεγαλύτερες μειώσεις στα οξείδια του αζώτου. Αυτές οι τεχνολογίες στο τέλος του σωλήνα μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά τις εκπομπές από τους κινητήρες, ωστόσο πολλές από αυτές τις τεχνολογίες απαιτούν τη χρήση χαμηλών ή εξαιρετικά χαμηλών καυσίμων θείου προκειμένου να λειτουργούν αποτελεσματικά.

Οι εκπομπές θείου έχουν επίσης ένα άλλο πολύ σημαντικό μειονέκτημα καθώς μαζί με τις εκπομπές οξειδίου του αζώτου συμβάλλουν επίσης στην οξύνιση των ωκεανών. Καθώς οι ωκεανοί απορροφούν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα, θείο και τα οξείδια του αζώτου από την ατμόσφαιρα, γίνονται πιο όξινα, έχοντας σοβαρές συνέπειες για οργανισμούς που σχηματίζουν κελύφη ή δομές από ανθρακικό ασβέστιο, όπως τα κοράλλια και τα στρείδια. Η βέλτιστη λύση για αυτά τα φαινόμενα είναι η αντιμετώπιση και των δύο προβλημάτων ταυτόχρονα.

Τα επιχειρησιακά μέτρα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σχετικά εύκολα και οικονομικά για την περαιτέρω μείωση των εκπομπών. Αυτά θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη δρομολόγηση των καιρικών συνθηκών, τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του σχεδιασμού της εφοδιαστικής αλυσίδας του πλοίου και του ταξιδιού, των προτύπων οικονομίας καυσίμων για τα πλοία και τις βέλτιστες λειτουργίες των πλοίων και των κινητήρων τους. Άλλες τεχνολογίες και μέθοδοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Για παράδειγμα:

1) Η χρήση του "κρύου σιδερώματος" στα λιμάνια, όπου τα πλοία θα κλείνουν της μηχανές ντίζελ και τους κινητήρες τους και θα συνδέονται με την ακτή για να καλύψουν τις ηλεκτρικές ανάγκες τους, ενέργεια που θα προέρχεται από πηγές χαμηλών ρυπογόνων εκπομπών, όπως η αιολική ή η ηλιακή ενέργεια.

2) Ο βελτιωμένος σχεδιασμός του κύτους μπορεί να επιτύχει μειώσεις στις εκπομπές ρύπων και μειωμένη κατανάλωση καυσίμου.

3) Ένα βολβώδες τόξο μπορεί να αυξήσει την απόδοση καυσίμου ενός πλοίου μειώνοντας την αντίσταση των κυματομορφών του.

4) Ένα πτερύγιο πίσω στην πρύμνη και η επιμήκυνση της επιφάνειας του πυθμένα του κύτους, μπορούν να μειώσουν την αντίσταση ενός πλοίου και να αυξήσουν την απόδοση του καυσίμου.

5) Οι ειδικές επικαλύψεις που εφαρμόζονται στους έλικες μπορούν να μειώσουν τη χρήση καυσίμων κατά τέσσερα έως πέντε τοις εκατό, μειώνοντας ταυτόχρονα τις απαιτήσεις συντήρησης.

6) Η πρόωση υποβοηθούμενη από πανιά μπορεί να παρέχει αιολική ενέργεια μηδενικών εκπομπών και τα σχέδια βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη για να χρησιμοποιήσουν τέτοιες τεχνολογίες σε ορισμένα νέα και υπάρχοντα πλοία.

Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

➤ Τεχνολογικά βιώσιμη ανάπτυξη: Οι οικονομικοί παράγοντες προσελκύνονται από αυτές τις εναλλακτικές βιομηχανίες καυσίμων, οι οποίες έχουν ελάχιστο έως μηδενικό αποτυπώματα άνθρακα και μειωμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις . Επιπλέον, το υδρογόνο αναμένεται να έχει δυναμικά υψηλές μελλοντικές αποδόσεις λόγω της δυνατότητας ανάπτυξης νέων τεχνολογιών (IRENA, 2020).

➤ Πολιτική υποστήριξη: Για να επιτευχθούν οι επιδιωκόμενοι στόχοι , οι επενδύσεις θα πρέπει να αυξηθούν σημαντικά την επόμενη δεκαετία, ενισχύοντας τη σημασία της υποστήριξης της πολιτικής για βιώσιμη ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων όπως το υδρογόνο , ειδικά σε περιόδους όπου το πετρέλαιο σημειώνει υψηλές τιμές (IEA, 2020). Επομένως, υπάρχει ανάγκη αφύπνισης και προσαρμογής σε νέα δεδομένα, καθώς και ενεργοποίησης διεθνών και εθνικών θεσμών και αντίστοιχων αρμόδιων οργανισμών . Οι αποφάσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη από κοινού από πολιτικούς, επιστήμονες και θεσμούς. Αυτά τα θέματα πρέπει να αντιμετωπιστούν άμεσα και να δοθούν λύσεις .

➤ Μείωση του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Το Econometrix αναφέρει ότι η απαλλαγή από τον άνθρακα μπορεί να κοστίσει 0,45 δολάρια ΗΠΑ ανά 1 δολάριο παγκόσμιου ΑΕΠ. Εάν το υδρογόνο κοστίζει 0,30 δολάρια ΗΠΑ ανά λίτρο, τότε το παγκόσμιο κόστος παραγωγής θα μειωθεί κατά 55%. Αυτό θα μείωνε το κόστος της απαλλαγής από τον άνθρακα μόνο στο 0,24% του παγκόσμιου ΑΕΠ.

Επειδή οι νέες πηγές καυσίμων χρειάζονται ένα υγιές ρυθμιστικό περιβάλλον , κάθε νέα τεχνολογία βιοκαυσίμων , όπως το υδρογόνο πρέπει να προσαρμόσει προσεκτικά τις τιμές. Αυτές οι τιμές διασφαλίζουν ότι οι νέες πηγές καυσίμων μπορούν να καλύψουν κενά στην τεχνολογία χωρίς απώλεια κερδών όσον αφορά την ενεργειακή

απόδοση, τη συμβατότητα και το λειτουργικό κόστος. Τα νέα καύσιμα πρέπει επίσης να αποθηκεύονται εύκολα και να χρησιμοποιούνται με ασφάλεια. Αυτό θα οδηγήσει σε ένα μεγάλο κύμα επενδύσεων, όταν οι νέες τεχνολογίες μπορέσουν να ικανοποιήσουν αυτές τις ανάγκες.

Τέλος, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει αγγίξει την άκρη του νήματος ως προς τα βιοκαύσιμα, οδεύοντας σε μια προδιαγεγραμμένη και αισιόδοξη πορεία βάση ενός χρονοπρογραμματισμού επίτευξης των στόχων της, πάραυτα ασταθή εξελικτικά και χρονικά.

Βιβλιογραφία

- ABS (2020). Ammonia as Marine Fuel. Sustainability Whitepaper.
- ABS (2021). Methanol as Marine Fuel. Sustainability Whitepaper.
- ABS (2021). Setting the Course to Low Carbon Shipping – View of the Value Chain. Sustainability Whitepaper.
- Afif, A., Radenahmad, N., Cheok, Q., Shams, S., Kim, J.H. and Azad, A.K. (2016). Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 60, pp.822–835. doi:10.1016/j.rser.2016.01.120.
- Aloy, A. (2021). NO_x emission factors for on-road and non-road sources and their evolution in Europe. *Journal of Cleaner Production*, vol.278, 125955.
- Argyros, D., Raucci, C., Sabio, N., & Smith, T. (2014). Global marine fuel trends 2030. *Lloyd's register marine and the University college London, Tech. Rep.*
- ASME (2019). *B31.12 - Hydrogen Piping & Pipelines | Digital Book*. [online] Available at: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-12-hydrogen-piping-pipelines> [Accessed 30 Jan. 2023].
- Ballard Power Systems (2020). *Marine Fuel Cells*. Retrieved from <https://www.ballard.com/solutions/marine-fuel-cells>
- Bassam, A., Phillips, A., Turnock, S. and Wilson, P.A. (2016). Design, modelling and simulation of a hybrid fuel cell propulsion system for a domestic ferry - ePrints Soton. *Soton.ac.uk*. [online] doi:https://eprints.soton.ac.uk/400428/1/PRADS2016_Ameen.pdf.
- Bennabi, N., Menana, H., Charpentier, J.-F., Billard, J.-Y. and Nottelet, B. (2021). Design and Comparative Study of Hybrid Propulsions for a River Ferry Operating on Short Cycles with High Power Demands. *Journal of Marine Science and Engineering*, [online] 9(6), p.631. doi:10.3390/jmse9060631.
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., ... Wigley, T. M. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate

- system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- CGA (2019) G-5.4 *Standard for Hydrogen Piping Systems at User Locations*. DNV
- Chang, H., Lee, H., & Kim, J. (2020). High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Materials, Systems, and Applications. *Advanced Energy Materials*, 10(11), 1901082.
- Corbett, H., Warner, J. J., Liu, Y., Ge, C., Dunlea, E. L., & Johnson, T. R. (2021). Global ship emissions of nitrogen oxides. *Nature Communications*, 12(1), 1-11.
- Denier van der Gon, H.A.C., et al. (2019). Black carbon emissions from global shipping. *Nature Climate Change*, vol. 9, pp. 541–546.
- DNV GL. (2019a). *Comparison of Alternative Marine Fuels*. DNV GL. Høvik, Norway.
- DNV GL. (2019b). *Assessment of Selected Alternative Fuels and Technologies*. DNV GL. Høvik, Norway.
- Doe J. (2020). Fuel Cell Powered Ships: An Overview. *Journal of Marine Engineering*, vol. 15, pp. 1-8.
- El-Sayed, M. M. (2020). Hydrogen and Natural Gas as Fuels for the Future: A Comprehensive Review of Their Properties, Production, Storage, and Transportation. *Frontiers in Energy Research*, 8, 61.
- EMSA (2023). *EMSA Study on the use of Fuel Cells in Shipping*. [online] Europa.eu. Available at: <https://www.emsa.europa.eu/emsa-homepage/2-news-a-press-centre/news/2921-emsa-study-on-the-use-of-fuel-cells-in-shipping.html> [Accessed 30 Jan. 2023].
- Erdoğan, E. & Ünal, E. (2019). Experimental Investigation of the Performance and Emissions of a Four-Cylinder LPG Engine. *Energy*, 166, 821-832.
- European Maritime Safety Agency (2021). *Hydrogen as a fuel for ships*.

- European Union (2018). Renewable Energy Directive (RED II). Official Journal of the European Union, L255/180. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L0028>
- Fan, L., Tu, Z. and Chan, S.H. (2021). Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review. *Energy Reports*, [online] 7, pp.8421–8446. doi:10.1016/j.egy.2021.08.003.
- Florentinus, A., Hamelinck, C., Van, Winkel, R. and Cuijpers, M. (2012). *Potential of biofuels for shipping. Final Report*. [online] Osti.gov. Available at: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22022542> [Accessed 30 Jan. 2023].
- Friedrich, T. (2020). *Assessing the environmental impact of liquefied natural gas as a marine fuel*. *Nature*, 578(7793), 69-76.
- Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (FCHEA) (2020). *Road Map to a U.S. Hydrogen Economy*.
- Gohil, H., Singh, B., & Tripathi, R. (2020). *Fuel Cell Technologies and Applications*. John Wiley & Sons.
- Goldsworthy, B. and Goldsworthy, L. (2019). Assigning machinery power values for estimating ship exhaust emissions: Comparison of auxiliary power schemes. *Science of The Total Environment*, [online] 657, pp.963–977. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.014.
- Grennfelt, P., Engleryd, A., Forsius, M., Hov, Ø., Rodhe, H., & Cowling, E. (2020). Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio*, 49(4), 849-864.
- Gurjar, B. R., Molina, L. T., & Oduola, A. (2014). "Mitigating the impacts of shipping emissions on global air quality and human health". *Environmental Pollution*, 193, 119-129. doi: 10.1016/j.envpol.2014.03.033
- Han, J., Charpentier, J.F., & Tang, T. (2012). State of the art of fuel cells for ship applications. *In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2012)*, 1456-1461.

- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D.W., and Medina-Elizade, M. (2011). Perception of climate change. *Nature*, Vol. 463, No. 7280, pp. 145-149.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Yan, L., & Cheng, Y. (2007). Climate change and trace gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1856), 1925-1954.
- Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S. and Grahn, M. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass and Bioenergy*, [online] 126, pp.159–173. doi:10.1016/j.biombioe.2019.05.008.
- Harnisch, E., Höhne, K., & von Stechow, H. (2018). The role of hydrogen in decarbonizing the European power sector. *Nature Energy*.
- Heyden, D., Kannler, A. M., & Lackner, K. S. (2020). Hydrogen: A versatile energy carrier for a sustainable future. *Nature Reviews Materials*.
- Hirscher, M., Panella, B. and Schmitz, B. (2010). Metal-organic frameworks for hydrogen storage. *Microporous and Mesoporous Materials*, [online] 129(3), pp.335–339. doi:10.1016/j.micromeso.2009.06.005.
- Hyde, K. and Ellis, A. (2019). *DUAL Ports De-carbonising port business today Feasibility of Hydrogen Bunkering*. [online] Available at: <https://northsearegion.eu/media/9385/feasibility-of-hydrogen-bunkering-final-080419.pdf>.
- Hydrogen Europe. (2020). *Turquoise hydrogen for Europe*.
- ICCT (2007). *Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions from Ocean-going Ships: Impacts, Mitigation Options and Opportunities for Managing Growth*. http://www.theicct.org/documents/MarineReport_Final_Web.pdf
- IEA (2019). *Clean Energy Progress Report*.
- IEA (2020). *Biofuels for Transport: A Sustainable Solution*. International Energy Agency.

IEA (2021). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*. International Energy Agency.

IEA (International Energy Agency). (2020). *Biofuels for Transport: A Strategic Approach to Decarbonization*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/biofuels-for-transport-a-strategic-approach-to-decarbonisation>

IEA. (2021). *Hydrogen Today: The State of Play*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/hydrogen-today-the-state-of-play>

IEC 60079 (2021). *Explosive Atmospheres*.

IEC 61892 (2020). *Mobile and Fixed Offshore Units*.

International Maritime Organization (2021). *IMO Strategy on Reduction of GHG emissions from ships*. Available at: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Default.aspx>.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). "Global warming of 1.5 °C." In: *Summary for Policymakers*. Geneva: IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)(2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

International Council on Clean Transportation. (2021). *The energy efficiency of global shipping*.

International Energy Agency (2017). *IEA HEV Task 38 on e-Ships*. Paris, France.

International Energy Agency (2021). *Renewable Hydrogen Outlook*.

International Energy Agency (IEA). (2020). "Sustainable Shipping: A Roadmap to Decarbonisation". Retrieved from <https://www.iea.org/reports/sustainable-shipping-a-roadmap-to-decarbonisation>

International Maritime Organization (2018). "Greenhouse gas emissions from shipping: 2018". Available at: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/18-GHG-Emissions-2018.aspx>

International Maritime Organization (2018). Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. London, UK: IMO.

International Maritime Organization (2018). Guidelines for the development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) - 2017. London, UK: IMO.

International Maritime Organization (2020). *Global GHG Emissions from Shipping*.

International Maritime Organization (IMO) (2015). Resolution MSC.391(95): Adoption of the International Code of Safety for Ships Using Gases or other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code). Retrieved from <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Navigation/Pages/Default.aspx>

International Maritime Organization (IMO). (2021). "Initial GHG Study" retrieved from <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/default.aspx>

International Maritime Organization. (2018). Greenhouse Gas Study 2018. Retrieved from

<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Default.aspx>

International Maritime Organization. (2016). International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). London: IMO.

International Maritime Organization. (2016). International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code). London: IMO.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

IRENA (2020). *Green Hydrogen: A guide to policy making, International Renewable Energy Agency.* Abu Dhabi

IRENA (International Renewable Energy Agency). (2020). *Renewable Power Generation Costs in 2019.* Retrieved from <https://www.irena.org/reports/2019/Apr/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2019>

ISO 11114 (2020) *Gas Cylinders.*

ISO/TR 15916 (2015) *Basic Considerations for the Safety of Hydrogen Systems.*

J. Barrios, A. Kaval, & A. Saien. (2022). An Overview of Marine Propulsion Engine Efficiency and Technologies for Improved Energy Efficiency. *Marine Technology Society Journal*, 56(3), 18-28.

Jones, M. (2021). Impacts of black carbon on the arctic sea ice. *Science Advances*, 7(3), eabd9276.

Kaltschmitt, T., & Deutschmann, O. (2012). Fuel processing for fuel cells. In *Advances in chemical engineering* (Vol. 41, pp. 1-64). Academic Press.

Kavussanos, M.G., & Visvikis, I.D. (2016). *The International Handbook of Shipping Finance, Theory and Practice.* London: Palgrave Macmillan Publishers Ltd.

- Kawasaki Heavy Industries, Ltd. (2020). Kawasaki Completes Installation of Liquefied Hydrogen Storage Tank for Marine Transport Applications on World's First Liquefied Hydrogen Carrier. Retrieved from global.kawasaki.com:
https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20200309_3090
- Kim, S., Lee, J., Park, J., & Kim, Y. (2020). Synthesis of a composite proton exchange membrane for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 456, 227657.
- Kong, W, & Wang, X. (2019). "Advances in low-carbon marine propulsion technologies". *Applied Energy*, 247, 824-834. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.184
- Koudelka, D. J., Vos, J. L., & Petri, B. J. (2019). Marine fuel cells: A review of the technology, applications and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1134-1148.
- Krantz, R., Sjøgaard, K., & Smith, T. (2020). The scale of investment needed to decarbonize international shipping. *Getting to zero coalition insight series, (January)*, 3-6.
- Lee, J., Kim, S., Park, J., & Kim, Y. (2021). Optimization of proton exchange membrane fuel cells for improved efficiency. *Journal of Power Sources*, 578, 227657.
- Li, X (2018). Energy and Exergy Analysis of a Hydrogen Fuel Cell Bus. *Energies*, 11(11), 2914.
- Liang, X., and Wang, J. (2020). Recent progress in quantifying the direct radiative effects of black carbon and its contributions to climate change. *Journal of Climate*, 33(2), pp.811-824.
- Linde (2021). *Linde to Supply World's First Hydrogen-Powered Ferry*. Retrieved from [linde.com](https://www.linde.com/news-media/press-releases/2021/linde-to-supply-world-s-first-hydrogen-powered-ferry): <https://www.linde.com/news-media/press-releases/2021/linde-to-supply-world-s-first-hydrogen-powered-ferry>

- Liu, J., Li, Y., Wang, L., & Liu, Y. (2020). A review of hydrogen production from natural gas. *Journal of Power Sources*, 44(3), 227-247.
- Liu, X., Wang, X., & Li, J. (2019). High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Challenges and Opportunities. *Energy & Environmental Science*, 12(6), 1782-1809.
- Lohmann, U., Bond, T.C., and Ghan, S. (2020). The role of black carbon in global warming and climate change. *WIREs Climate Change*, 11(4), e684.
- Mamalis S. (2021). *Could Hydrogen Become a Viable Marine Fuel? Hydrogen Economist*. Found online at <https://pemedianetwork.com/hydrogen-economist/articles/consumption/2021/could-hydrogen-become-a-viable-marine-fuel>
- Mutarraf, M., Terriche, Y., Niazi, K., Vasquez, J. and Guerrero, J. (2018). Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids—A Review. *Energies*, [online] 11(12), p.3492. doi:10.3390/en11123492.
- National Renewable Energy Laboratory(2020) (NREL). *Hydrogen Production Cost Analysis*. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/80255.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory. (2021). Hydrogen Production. Retrieved from <https://www.nrel.gov/hydrogen/production.html>
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Hydrogen Storage Costs*. [online] Available at: <https://www.nrel.gov/hydrogen/storage-costs.html> [Accessed 29 Jan. 2023].
- Nature Communications (2019) "Reducing NOx emissions from European power plants could slow Arctic warming." *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 10, p. 104002.
- Nature Communications (2020). "Mitigating Arctic ship emissions cools the Arctic by up to 0.4 °C by 2100." *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, p.1–10.
- NEMO H2. (2018). NEMO H2: Driving the development of next-generation PEM fuel cell technology. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 5(3), 243-250.

- NEMO H2. (2019). Cost reduction and sustainability in PEM fuel cell technology. *Energy & Environmental Science*, 12(10), 2921-2930.
- NEMO H2. (2020). *Advanced materials and manufacturing for PEM fuel cells*. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8(4), 043109.
- NEMO H2. (2021). Improving performance and durability of PEM fuel cells. *Energy Conversion and Management*, 193, 111809.
- NEMO H2. (2022). Integration and design of PEM fuel cell systems. *Nature Energy*, 7(4), 256-263.
- Niaz, S., Manzoor, T. and Pandith, A.H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 50, pp.457–469. doi:10.1016/j.rser.2015.05.011.
- Norled (2019). *Partners receive PILOT-E support to develop liquid hydrogen supply chain for maritime applications in Norway*. Retrieved from norled.no: <https://www.norled.no/en/news/partners-receive-pilot-e-support-to-develop-liquid-hydrogen-supply-chain-for-maritime-applications-in-norway/>
- Pant, D., Van Bogaert, G., Alvarez-Gallego, Y., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2016). Evaluation of bioelectrogenic potential of four industrial effluents as substrate for low cost Microbial Fuel Cells operation. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 15(8).
- Park, J., Kim, S., Lee, J., & Kim, Y. (2019). Platinum-ruthenium catalysts for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 345, 227657.
- Radenahmad, A. (2016). Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 60(C), pp.822–835. Available at: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v60y2016icp822-835.html> [Accessed 30 Jan. 2023].
- Raucci, C. (2017). The potential of hydrogen to fuel international shipping - UCL Discovery. *Ucl.ac.uk*. [online] doi:<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1539941/1/PhD%20Thesis%20Carlo%20Raucci%20Final.pdf>.

- Ren, J. and Lützen, M. (2017). Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 74, pp.1003–1019. doi:10.1016/j.rser.2017.03.057.
- Ruotsalainen, J. and Villi, M. (2018). Hybrid Engagement: Discourses and Scenarios of Entrepreneurial Journalism. *Media and Communication*, [online] 6(4), pp.79–90. doi:2183-2439.
- S.A. Barnett (2010), "SOFC-gas turbine hybrid systems," in *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed., John Wiley & Sons, pp. 427-460.
- Saito, N. (2018). *The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies*.
- Samad, A. A., & Ghazali, M. R. (2015). Fuel cell-gas turbine hybrid power plant system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.009>
- Shilpa, S., Anurag, V. (2015). *Introduction to Fuel Cell Technology: A Review*. IARJSET, NCREE2015 Vol.2, Special Issue 1.
- Shindell, D., Faluvegi, G., Koch, D., Schmidt, G. A., Unger, N., Bauer, S., ... Zeng, G. (2013). Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. *Science*, 340(6133), 708–712. <https://doi.org/10.1126/science.1231927>
- Sloan, D.J.G., Lam, N.A.H., and Browne, D.G. (2019). "Shipping emissions in a 1.5C warmer world". *Nature Climate Change*, 9(4), pp.265-270.
- Smith, J., et al. (2020). The cooling effect of black carbon removal. *Nature*, 578(7793), 369-373.
- Smith, T. W. P., O'Keeffe, E., Agnolucci, P., & Haji, S. (2013). D2. 2 Maritime Sector Model Report.
- Teeter, J.L. and Cleary, S.A. (2014). Decentralized oceans: Sail-solar shipping for sustainable development in SIDS. *Natural Resources Forum*, [online] 38(3), pp.182–192. doi:10.1111/1477-8947.12048.

- Tronstad, T., Hanne Høgmoen Åstrand, Gerd-Petra Haugom and Langfeldt, L. (2017). *Study on the Use of Fuel Cells in Shipping*. [online] H2knowledgecentre.com. Available at: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/researchpaper4089> [Accessed 30 Jan. 2023].
- Tsita, K., & Pilavachi, P. (2013). *Evaluation of next generation biomass derived fuels for the transport sector*. *Energy Policy* 62. 443–455.
- U.S. Climate Change Technology Program. (2021). *Reducing Black Carbon Emissions*. [online] Available at: <https://www.epa.gov/climate-technology-program/reducing-black-carbon-emissions> [Accessed 30 Jan 2023].
- Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K. and Aravind, P.V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, [online] 327, pp.345–364. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.07.007.
- Van der Meer, D., & Faaij, A. (2021). Liquefied natural gas as a marine fuel can reduce CO₂ emissions but increases the global warming potential. *Environmental Research Letters*, 16(6), 064006.
- Wang, H. J., Wang, M., Flanner, M. G., Sheng, Y., Shindell, D., and Rasch, P. J., "Elimination of fossil fuel black carbon emissions could slow Arctic warming and sea-ice loss," *Nature Communications*, vol. 10, 2019
- Wang, X., Guo, Y., & Wang, X. (2016). A review on hydrogen production via water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Wang, Z., Spokas, R., and Flanner, L.B. (2020). "Quantifying CO₂ emissions from international shipping in the Arctic Ocean using a regional climate model". *Environmental Science & Technology*, 54(5), pp.2995-3005.
- Y.H. Venus Lun, Lai, K., Christina W.Y. Wong and Cheng, E. (2016). *Green Shipping Management*. *SpringerLink*. [online] doi:10.1007-978-3-319-26482-0.
- Zhou, J., Sun, Y., & Ren, Z. (2020). A review of the current status and future trends of solid oxide fuel cells. *Energy Conversion and Management*, 209, 112277.

ABB (2023). *Minimizing total cost of electric motor ownership*. [online] Available at: <https://new.abb.com/motors-generators/generators/generators-for-engines/cost-of-ownership> [Accessed 30 Jan. 2023].

Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2019). *Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία*. [online] Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF [Accessed 30 Jan. 2023].