



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Μετάβαση στην Πράσινη Ναυτιλία - Πράσινες τεχνολογίες στα πλοία

Transition to Green Shipping - Green technologies on ships

Συγγραφέας:

Μωράκης Δημήτριος-Ανδρέας

A.M.: 18393060

Επιβλέπουσα: Δρ. Σωτηρία Δημητρέλλου

Αιγάλεω, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Μετάβαση στην Πράσινη Ναυτιλία - Πράσινες τεχνολογίες στα πλοία

Συγγραφέας

Μωράκης Δημήτριος-Ανδρέας (Α.Μ.: 18393060)

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Δρ. Σωτηρία Δημητρέλλου

Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

13/03/2024

Εξεταστική Επιτροπή

Σωτηρία Δημητρέλλου

Αναπλ. Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.

Παγώνης Δημήτριος-Νικόλαος

Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Σέρρης Μιχαήλ

Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μωράκης Δημήτριος - Ανδρέας του Στυλιανού, με αριθμό μητρώου 18393060 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Μωράκης Δημήτριος-Ανδρέας

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο "Μετάβαση στην πράσινη ναυτιλία - Πράσινες τεχνολογίες στα πλοία", περιηγείται στο πεδίο των πράσινων τεχνολογιών στη ναυτιλιακή βιομηχανία, εξετάζοντας στο πρώτο κεφάλαιο την υφιστάμενη νομοθεσία για τη μείωση των ρύπων, τα μελλοντικά σενάρια για την ενσωμάτωση των πράσινων τεχνολογιών στα πλοία και τα κύρια στάδια για τη μετάβαση ενός υφιστάμενου πλοίου σε «πράσινο» πλοίο. Στη συνέχεια, διερευνά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική, η βιοενέργεια, η υδροδυναμική και η πυρηνική ενέργεια, αναλύοντας λεπτομερώς το νομοθετικό τους πλαίσιο, τις αρχές λειτουργίας, τις εκπομπές ρύπων, την ενεργειακή απόδοση και την ενσωμάτωσή τους στον ναυτιλιακό τομέα. Η εργασία εξετάζει επίσης τα εναλλακτικά καύσιμα, όπως η μεθανόλη, η αμμωνία, τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο, αναφέροντας τις διαδικασίες καύσης, τις εκπομπές ρύπων και την εγκατάσταση των συστημάτων αυτών σε πλοία, συμπεριλαμβανομένου της αποθήκευσης, του ανεφοδιασμού και της διαθεσιμότητας κινητήρων. Επιπλέον, εμβαθύνει στις ιδιαιτερότητες των συστημάτων κυψελών καυσίμου και την εφαρμογή τους στα πλοία, αναλύοντας τη λειτουργία, την εγκατάσταση, την αποθήκευση καυσίμων, τις διαδικασίες ανεφοδιασμού και θέματα ασφαλείας. Τέλος, διερευνά το ρόλο του υγροποιημένου φυσικού αερίου στη ναυτιλία, με αναφορά στη νομοθεσία, τη διαδικασία καύσης, την εγκατάσταση σε πλοία, τον ανεφοδιασμό, καθώς και τη χρήση πλωτών μονάδων παραγωγής, αποθήκευσης και επαναεριοποίησης.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αποσκοπεί στην παροχή λεπτομερούς πληροφορίας και τεχνικής γνώσης για τις τεχνολογίες και τα συστήματα της πράσινης ναυτιλίας, υπογραμμίζοντας τις προβλέψεις για τον κλάδο έως το 2050.

Λέξεις-κλειδιά: Πράσινη ναυτιλία, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, εναλλακτικά καύσιμα, κυψέλες καυσίμου, υγροποιημένο φυσικό αέριο

Abstract

This Diploma Thesis, entitled "Transition to Green Shipping - Green Technologies on Ships", explores the field of green technologies in the shipping industry, examining in the first chapter the existing legislation for the reduction of pollutants, the future scenarios for the integration of green technologies on ships and the main steps for the transition of an existing ship to a "green" ship. It explores renewable energy sources such as solar, wind, bioenergy, hydrodynamic and nuclear energy, detailing their legislative framework, operating principles, emissions, energy efficiency and their integration into the maritime sector. The thesis also examines alternative fuels such as methanol, ammonia, biofuels and hydrogen, discussing the combustion processes, emissions and the installation of these systems on ships, including storage, bunkering and engine availability. In addition, it delves into the fuel cell systems and their application on ships, discussing the operation, installation, fuel storage, bunkering and safety issues. Finally, it investigates the role of LNG in shipping, with reference to legislation, the combustion process, installation on ships, bunkering, and the use of Floating LNG and Floating Storage Regasification Units.

This Diploma Thesis aims to provide detailed information and technical knowledge on green shipping technologies and systems, highlighting the forecast projections up to 2050.

Keywords: Green Shipping, renewable energy sources, alternative fuels, fuel cells, liquefied natural gas

Περιεχόμενα

1. Ο δρόμος προς την Πράσινη Ναυτιλία	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Υφιστάμενη νομοθεσία.....	14
1.3 Πράσινες τεχνολογίες	19
1.4 Μελλοντικά σενάρια για τη ναυτιλία	21
1.5 Μετάβαση υπάρχοντος πλοίου σε «πράσινο» πλοίο.....	25
1.5.1 Αξιολόγηση των υφιστάμενων συστημάτων και υποδομών.....	25
1.5.2 Μελέτη σκοπιμότητας.....	26
1.5.3 Σχεδιασμός.....	26
1.5.4 Ρυθμιστική έγκριση και πιστοποίηση.....	26
1.5.5 Εφαρμογή και δοκιμή	27
1.5.6 Λειτουργία και συντήρηση	27
2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	28
2.1 Ηλιακή ενέργεια.....	28
2.1.1 Νομοθεσία και κανονισμοί	28
2.1.2 Αρχή λειτουργίας	28
2.1.3 Εκπομπές ρύπων.....	30
2.1.4 Ενεργειακή απόδοση	30
2.1.5 Εφαρμογή σε πλοία	30
2.2 Αιολική ενέργεια	33
2.2.1 Νομοθεσία και κανονισμοί.....	33
2.2.2 Αρχή λειτουργίας	33
2.2.3 Εκπομπές ρύπων.....	36

2.2.4	Ενεργειακή απόδοση	36
2.2.5	Εφαρμογή σε πλοία	36
2.3	Βιοενέργεια.....	38
2.3.1	Νομοθεσία και κανονισμοί	38
2.3.2	Αρχή λειτουργίας	39
2.3.3	Εκπομπές ρύπων.....	40
2.3.4	Ενεργειακή απόδοση	40
2.3.5	Εφαρμογή σε πλοία	40
2.4	Υδροδυναμική / κυματική ενέργεια	41
2.4.1	Νομοθεσία και κανονισμοί	41
2.4.2	Αρχή λειτουργίας	42
2.4.3	Εκπομπές ρύπων.....	43
2.4.4	Ενεργειακή απόδοση	43
2.4.5	Εφαρμογή σε πλοία	43
2.5	Πυρηνική ενέργεια.....	44
2.5.1	Νομοθεσία και κανονισμοί	44
2.5.2	Αρχή λειτουργίας	45
2.5.3	Εκπομπές ρύπων.....	46
2.5.4	Ενεργειακή απόδοση	47
2.5.5	Εφαρμογή σε πλοία	47
2.6	Μελλοντικά σενάρια ΑΠΕ έως το 2050.....	50
3.	Εναλλακτικά καύσιμα.....	52
3.1	Μεθανόλη	52
3.1.1	Νομοθεσία και κανονισμοί	52
3.1.2	Χαρακτηριστικά.....	52
3.1.3	Διαδικασία καύσης	53

3.1.4 Εκπομπές ρύπων.....	54
3.1.5 Εγκατάσταση συστήματος	54
3.2 Αμμωνία.....	56
3.2.1 Νομοθεσία και κανονισμοί	56
3.2.2 Χαρακτηριστικά.....	56
3.2.3 Διαδικασία καύσης	57
3.2.4 Εκπομπές ρύπων.....	58
3.2.5 Εγκατάσταση συστήματος	58
3.3 Υδρογόνο.....	61
3.3.1 Νομοθεσία και κανονισμοί	61
3.3.2 Χαρακτηριστικά.....	61
3.3.3 Διαδικασία καύσης	62
3.3.4 Εκπομπές ρύπων.....	63
3.3.5 Εγκατάσταση συστήματος	63
3.4 Βιοκαύσιμα	66
3.4.1 Νομοθεσία και κανονισμοί	66
3.4.2 Χαρακτηριστικά.....	67
3.4.3 Διαδικασία καύσης	69
3.4.4 Εκπομπές ρύπων.....	70
3.4.5 Εγκατάσταση συστήματος	71
3.5 Μελλοντικά σενάρια.....	73
4. Κυψέλες καυσίμου.....	77
4.1 Ορισμός.....	77
4.1.1 Νομοθεσία και κανονισμοί	79
4.2 Αρχή λειτουργίας	80
4.2.1 Κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων	80

4.2.2 Ο "κινητήρας" ενός συστήματος κυψελών καυσίμου	82
4.3 Υιοθέτηση τεχνολογίας κυψελών καυσίμου.....	84
4.3.1 Εγκατάσταση συστήματος	84
4.3.2 Θέματα επιχειρησιακής ασφάλειας	85
4.4 Ανεφοδιασμός των πλοίων	86
4.5 Παραδείγματα πλοίων με Fuel Cells.....	89
5. Υγροποιημένο φυσικό αέριο	92
5.1 Νομοθεσία και κανονισμοί	92
5.2 Χαρακτηριστικά ΥΦΑ	93
5.3 Διαδικασία καύσης	94
5.4 Εγκατάσταση συστήματος σε πλοίο	95
5.4.1 Αποθήκευση καυσίμου και δεξαμενή καυσίμου	95
5.4.2 Τροποποιήσεις μηχανοστασίου.....	96
5.4.3 Πυρασφάλεια.....	97
5.5 Ανεφοδιασμός πλοίων ΥΦΑ.....	98
5.5.1 Ανεφοδιασμός από τερματικό σταθμό σε πλοίο.....	98
5.5.2 Ανεφοδιασμός από πλοίο σε πλοίο.....	99
5.5.3 Ανεφοδιασμός από φορτηγό σε πλοίο.....	99
5.6 Πλωτές μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και επαναεριοποίησης ΥΦΑ.....	99
5.6.1 Πλωτή μονάδα παραγωγής ΥΦΑ (FLNG)	100
5.6.2 Πλωτή μονάδα αποθήκευσης και επαναεριοποίησης ΥΦΑ (FSRU)	101
6. Συμπεράσματα.....	103

1. Ο δρόμος προς την Πράσινη Ναυτιλία

1.1 Εισαγωγή

Ο αναντικατάστατος ρόλος της ναυτιλίας στο παγκόσμιο εμπόριο και στην οικονομία των κρατών αναγνωρίζεται ολοένα και περισσότερο στη σύγχρονη εποχή. Πάνω από το 90% των παγκόσμιων αγαθών μεταφέρονται δια θαλάσσης, γεγονός που χαρακτηρίζει τον κλάδο ως τη ραχοκοκαλιά του διεθνούς εμπορίου [1]. Ωστόσο, η ναυτιλιακή βιομηχανία, ως σημαντικός συντελεστής των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, βρίσκεται σήμερα σε ένα κρίσιμο σταυροδρόμι. Λόγω της κλίμακας του τομέα, η ναυτιλία αντιπροσωπεύει το ~3% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), και οι αυστηροί περιβαλλοντικοί κανονισμοί σχετικά με τις εκπομπές NOx, SOx και CO₂ αναμένεται να προκαλέσουν σημαντικές τεχνολογικές αλλαγές στον κλάδο [2]. Η μετάβαση στην "πράσινη ναυτιλία" δεν αποτελεί μόνο ηθική επιταγή αλλά και πρακτική αναγκαιότητα για ένα βιώσιμο μέλλον.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο "Μετάβαση στην πράσινη ναυτιλία - Πράσινες τεχνολογίες στα πλοία", επιχειρεί μια ολοκληρωμένη εξέταση του αναδυόμενου τομέα των πράσινων τεχνολογιών. Διερευνά την τρέχουσα κατάσταση της ναυτιλίας, το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα και τις διάφορες οδούς που μπορεί να ακολουθήσει ο κλάδος για να μειώσει σημαντικά αυτό το αποτύπωμα. Αν και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της ναυτιλιακής βιομηχανίας είναι σημαντικός, υπάρχουν τεράστιες δυνατότητες αλλαγής του, μέσω καινοτομιών στην πράσινη τεχνολογία, ώστε να συμβάλει θετικά στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

Στο επίκεντρο αυτής της εργασίας βρίσκεται η διερεύνηση των αμέτρητων διαθέσιμων πράσινων τεχνολογιών και της δυνατότητας εφαρμογής τους στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Κάθε τεχνολογία θα συζητηθεί λεπτομερώς, εξετάζοντας τα οφέλη, τις προκλήσεις και την εμπορική βιωσιμότητα. Η στροφή προς ένα πιο βιώσιμο μοντέλο ναυτιλίας θα περιλαμβάνει όχι μόνο την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών, αλλά και την αλλαγή των προτύπων του κλάδου, των κανονιστικών πλαισίων και της συνολικής νοοτροπίας προς την περιβαλλοντική ευθύνη.

Η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία είναι βαθιά ριζωμένη στην παράδοση και η μετάβαση σε πράσινες τεχνολογίες θα συναντήσει αναμφίβολα αντιδράσεις. Ωστόσο, οι επιταγές της κλιματικής αλλαγής, μαζί με την αυξανόμενη πίεση του κοινού και των κυβερνήσεων, έχουν αρχίσει να γέρνουν την πλάστιγγα προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

Ουσιαστικά, η παρούσα μελέτη στοχεύει να φωτίσει την πορεία προς την πράσινη ναυτιλία, συμβάλλοντας έτσι στον συνεχιζόμενο διάλογο γύρω από την παγκόσμια απαλλαγή από τον άνθρακα. Μέσω της έρευνας και της ανάλυσης, τα κεφάλαια που ακολουθούν θα παρουσιάσουν μια λεπτομερή διερεύνηση των πράσινων τεχνολογιών στα πλοία, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες και συστάσεις που θα βοηθήσουν να κατευθυνθεί η ναυτιλιακή βιομηχανία προς ένα βιώσιμο μέλλον. Με τη στενή εξέταση των πρακτικών και των δυνατοτήτων των πράσινων τεχνολογιών, η παρούσα μελέτη στοχεύει να δώσει ώθηση στην περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα, ωθώντας τη βιομηχανία στην εποχή της πράσινης ναυτιλίας.

Συμπερασματικά, η μετάβαση στην πράσινη ναυτιλία είναι κάτι περισσότερο από μια απλή τάση- είναι μια αναγκαιότητα που γεννήθηκε από την αναγνώριση των σημαντικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κλάδου. Η συλλογική προσπάθεια των ενδιαφερομένων μερών, καθοδηγούμενη από τις γνώσεις και τις στρατηγικές που περιγράφονται στην παρούσα εργασία, μπορεί να προαναγγείλει μια νέα εποχή πράσινης, βιώσιμης ναυτιλίας που όχι μόνο θα στηρίζει την παγκόσμια οικονομία μας αλλά και θα προστατεύει τον πλανήτη μας.

1.2 Υφιστάμενη νομοθεσία

Σε μια προσπάθεια να προωθηθούν βιώσιμες πρακτικές στη ναυτιλία και να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κλάδου, έχουν θεσπιστεί διάφορες διεθνείς, εθνικές και οργανωτικές νομοθεσίες και κανονισμοί. Οι οδηγίες αυτές επιδιώκουν να περιορίσουν τους ρύπους, να επιβάλουν πράσινες πρακτικές και, στην ουσία, να μεταβάλουν τη βιομηχανία με πιο βιώσιμες λειτουργίες.

Ένας από τους σημαντικότερους διεθνείς ρυθμιστικούς φορείς που επηρεάζουν την παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία είναι ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO). Ο IMO έχει επιβάλει διάφορα μέτρα που αποσκοπούν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων, κυρίως μέσω της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL), η οποία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες συμβάσεις για το θαλάσσιο περιβάλλον.

Η MARPOL καλύπτει τη μείωση διαφόρων ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των οξειδίων του αζώτου (NOx), των οξειδίων του θείου (SOx) και των αιωρούμενων σωματιδίων (PM). Το παράρτημα VI της MARPOL ασχολείται ειδικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία. Θέτει όρια στις εκπομπές SOx και NOx από τις εξατμίσεις των πλοίων και απαγορεύει τις σκόπιμες εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον [3].

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα οξείδια του θείου (SO_x) είναι σημαντικοί ατμοσφαιρικοί ρύποι που παράγονται από τους ναυτικούς κινητήρες και έχουν δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία όπως φαίνεται στις εικόνες 1 και 2. Οι κανονισμοί για τις εκπομπές αυτές εφαρμόζονται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) στο πλαίσιο του πρωτοκόλλου MARPOL Annex VI.

Κανονισμοί NO_x (κανονισμός 13 του IMO): Τα όρια εκπομπών NO_x εφαρμόζονται στους κινητήρες ντίζελ ανάλογα με την ημερομηνία λειτουργίας και την ονομαστική τους ταχύτητα. Ο κανονισμός είναι κλιμακωτός:

- Βαθμίδα I (17,0 έως 40,0 g/kWh) που εφαρμόζεται από το 2000 για νέους κινητήρες με ισχύ άνω των 130 kW.
- Τα πρότυπα Tier II (7,7 έως 14,4 g/kWh) τέθηκαν σε ισχύ το 2011, αυστηροποιώντας περαιτέρω τα όρια.
- Τα πρότυπα Tier III (2,0 έως 3,4 g/kWh) ισχύουν μόνο για τα πλοία που λειτουργούν σε καθορισμένες "Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών NO_x" (NECA) από το 2016.

Κανονισμοί SO_x (κανονισμός 14 του IMO): Ο κανονισμός αυτός επικεντρώνεται στη μείωση της περιεκτικότητας σε θείο στο μαζούτ, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές SO_x. Τα όρια έχουν ως εξής:

- Ένα παγκόσμιο όριο 0,5% m/m (μάζα ανά μάζα) τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2020 (μειωμένο από 3,5% m/m την 1η Ιανουαρίου 2012).
- Εντός των Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (ECA), η περιεκτικότητα του μαζούτ σε θείο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1% m/m από την 1η Ιανουαρίου 2015.

Οι Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA) περιλαμβάνουν επί του παρόντος τη Βαλτική Θάλασσα, τη Βόρεια Θάλασσα, την ECA της Βόρειας Αμερικής (η οποία περιλαμβάνει καθορισμένες παράκτιες περιοχές ανοικτά των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά) και την ECA της Καραϊβικής Θάλασσας των Ηνωμένων Πολιτειών.

Tier	Date	NOx Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016†	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

† In NOx Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).

Εικόνα 1: Όρια εκπομπών NOx του παραρτήματος VI της MARPOL

Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SOx ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	
2012	0.1%	3.5%
2015		0.5%
2020		

Εικόνα 2: Όρια SOx στα καύσιμα του παραρτήματος VI της MARPOL

Στην προσπάθεια περιορισμού των εκπομπών CO₂ από τη ναυτιλία, ο IMO έχει αναπτύξει μια σειρά τεχνικών και λειτουργικών μέτρων.

Σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίου (SEEMP - Ship Energy Efficiency Management Plan):

Το SEEMP είναι ένα επιχειρησιακό μέτρο που θεσπίζει έναν μηχανισμό για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Το SEEMP παρέχει μια προσέγγιση για την παρακολούθηση των επιδόσεων αποδοτικότητας του πλοίου και του στόλου με την πάροδο του χρόνου και βοηθά στον εντοπισμό των ανεπαρκειών στις συνολικές λειτουργίες. Το σχέδιο αυτό είναι υποχρεωτικό για όλα τα πλοία, όπως επιβάλλεται από τις κατευθυντήριες γραμμές του IMO MEPC.213(63) από τον Ιανουάριο του 2013.

Δείκτης ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων πλοίων (EEXI - Energy Efficiency eXisting ship Index):

Ο EEXI είναι ένα μέτρο της εγγενούς ενεργειακής απόδοσης ενός υπάρχοντος πλοίου από την άποψη της ποσότητας CO₂ που εκπέμπεται ανά μονάδα μεταφορικού έργου. Προδιαγράφει το απαιτούμενο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης για διάφορους τύπους πλοίων. Ο EEXI αντιπροσωπεύει ένα πρότυπο που πρέπει να τηρείται, διασφαλίζοντας ότι τα υπάρχοντα πλοία θα προβούν σε τεχνικές τροποποιήσεις εάν υπερβαίνουν τις καθορισμένες εκπομπές CO₂. Οι απαιτήσεις του EEXI θα τεθούν σε ισχύ το 2023, σύμφωνα με τις τροποποιήσεις του IMO MEPC.323(74). Η εφαρμογή του δείκτη EEXI διασφαλίζει ότι τα

πλοία διατηρούν ή βελτιώνουν την ενεργειακή τους απόδοση με τεχνικά μέσα, όπως η βελτίωση του σχεδιασμού του κύτους, η χρήση προηγμένων μηχανισμών πρόωσης και η εφαρμογή συστημάτων ανάκτησης ενέργειας.

Δείκτης ενεργειακής απόδοσης σχεδιασμού (EEDI - Energy Efficiency Design Index): Ο EEDI είναι ένα παρόμοιο μέτρο με τον EEXI, αλλά στοχεύει ειδικά στα νέα πλοία, υποδεικνύοντας την ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται ανά μονάδα μεταφορικού έργου. Οι απαιτήσεις του EEDI είναι σταδιακές, με τη Φάση 0 να ξεκινά από το 2013 (κανονισμοί IMO MEPC.203(62)), τη Φάση 1 από το 2015, τη Φάση 2 από το 2020 και τη Φάση 3 που προγραμματίζεται να ξεκινήσει από το 2025.

Η βασική διαφορά μεταξύ του EEXI και του EEDI είναι ότι ο EEXI ισχύει για τα υπάρχοντα πλοία, ενώ ο EEDI για τα νέα πλοία. Και τα δύο πρότυπα, ωστόσο, αποσκοπούν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και στη μείωση των εκπομπών CO₂.

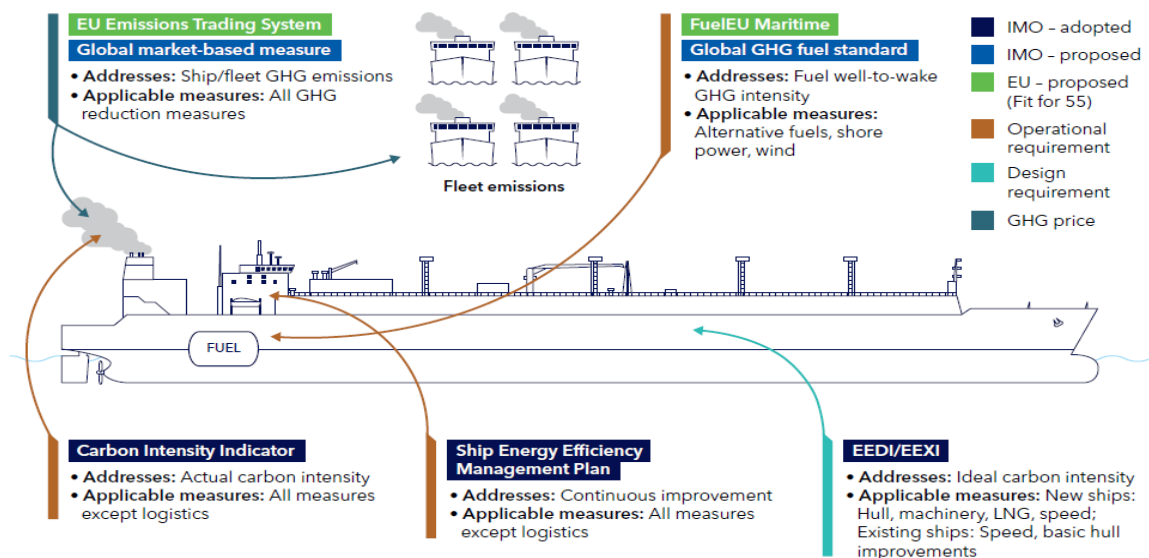
Δείκτης έντασης άνθρακα (CII - Carbon Intensity Indicator): Ο CII είναι ένα λειτουργικό μέτρο που κατατάσσει τα πλοία ανάλογα με την ένταση του άνθρακα και εκφράζει τις πραγματικές εκπομπές CO₂ ενός πλοίου ανά μονάδα μεταφορικού έργου. Ο CII μετρά την ενεργειακή απόδοση ενός πλοίου κατά τη λειτουργία του. Οι υποχρεωτικές απαιτήσεις του CII θα επιβληθούν από το 2023, σύμφωνα με τις τροποποιήσεις του IMO MEPC.323(74). Σε κάθε πλοίο αντιστοιχίζεται ένας ετήσιος λειτουργικός δείκτης έντασης άνθρακα (CII), ο οποίος καθορίζει τον ετήσιο συντελεστή μείωσης που απαιτείται για να εξασφαλιστεί η συνεχής βελτίωση της λειτουργικής έντασης άνθρακα του πλοίου εντός ενός συγκεκριμένου επιπέδου αξιολόγησης.

Κάθε ένας από αυτούς τους κανονισμούς αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη πτυχή του κύκλου ζωής ενός πλοίου, από τον σχεδιασμό (EEDI) έως τη λειτουργία (CII), και από τα νέα πλοία (EEDI) έως τον υπάρχοντα στόλο (EEXI), όλα υπό το γενικό πλαίσιο ενός σχεδίου διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης (SEEMP). Τα μέτρα αυτά αποτελούν μια ολοκληρωμένη δέσμη εργαλείων που βοηθούν τη ναυτιλιακή βιομηχανία να μειώσει τις περιβαλλοντικές της επιπτώσεις και να επιτύχει τους στόχους της για τη μείωση των εκπομπών.

Εκτός από αυτούς τους διεθνείς κανονισμούς, οι εθνικές κυβερνήσεις και οι νηογνώμονες επιβάλλουν επίσης διάφορους κανόνες και πρότυπα για την προώθηση της πράσινης ναυτιλίας όπως φαίνεται στην εικόνα 3. Οι νηογνώμονες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αξιολόγηση των πλοίων ως προς τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφάλειας και πρόληψης της ρύπανσης. Πιστοποιούν ότι τα πλοία έχουν

σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα και εξακολουθούν να πληρούν τα πρότυπα αυτά καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

Αυτές οι νομοθετικές και κανονιστικές προσπάθειες υπογραμμίζουν την παγκόσμια δέσμευση για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Αποτελούν σημαντικό βήμα προς την επίτευξη των ευρύτερων στόχων της ενεργειακής απόδοσης, της μείωσης του άνθρακα και τελικά της βιωσιμότητας της παγκόσμιας ναυτιλιακής βιομηχανίας. Δεν αποτελούν την τελική λύση, αλλά μάλλον ένα σημείο εκκίνησης προς ένα πιο πράσινο και πιο βιώσιμο ναυτιλιακό μέλλον.



Εικόνα 3: Ρυθμιστικό πλαίσιο του IMO και της ΕΕ για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία [4]

Το κανονιστικό πλαίσιο που αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία διαρκώς εξελίσσεται. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει εισάγει σημαντικούς κανονισμούς CO₂, με ισχύ από την 1η Ιανουαρίου 2023, με στόχο τη βελτίωση της τεχνικής και λειτουργικής απόδοσης και των συστημάτων διαχείρισης των πλοίων. Οι τελικές κατευθυντήριες γραμμές για τους κανονισμούς αυτούς εγκρίθηκαν στην MEPC 78 τον Ιούνιο του 2022.

Ο IMO εξετάζει επίσης την επικαιροποίηση της στρατηγικής του για τα αέρια του θερμοκηπίου το 2023 για να εντείνει τις φιλοδοξίες του όσον αφορά την ένταση του άνθρακα και τη συνολική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παρόλο που η MEPC 77 τον Νοέμβριο του 2021 αναγνώρισε την ανάγκη για αυστηρότερες φιλοδοξίες, οι λεπτομέρειες βρίσκονται ακόμη υπό διαπραγμάτευση, με την πλήρη απαλλαγή από τον άνθρακα έως το 2050 να αποτελεί σημαντικό σημείο συζήτησης. Υπάρχουν επίσης προτάσεις σχετικά με πιθανές ρυθμιστικές προσεγγίσεις για την επίτευξη αυτών των στόχων.

Έχουν προταθεί μέτρα βασισμένα στην αγορά (MBM - Market-Based Measures) για την παροχή χρηματικών κινήτρων για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Έχουν προταθεί τέσσερις παραλλαγές MBM, οι οποίες περιλαμβάνουν διαφορετικά συστήματα εισφορών και ένα σύστημα ανώτατου ορίου και εμπορίας, που μοιάζει με το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) της ΕΕ. Τα έσοδα από αυτά τα συστήματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον μετριασμό του κλίματος και την προσαρμογή τόσο εντός όσο και εκτός του ναυτιλιακού τομέα. Οι αρχικές εκτιμήσεις των επιπτώσεων αυτών των MBM προβλέπουν μια τιμή CO₂ ή GHG που κυμαίνεται μεταξύ 50 USD/tCO₂ και 300 USD/tCO₂ μέχρι το 2050 [5], με το κόστος των μεταφορών να αυξάνεται κατά 50% έως 90%, εάν επιδιωχθεί πλήρης απεξάρτηση από τον άνθρακα μέχρι το 2050. Το μελλοντικό χάσμα τιμών μεταξύ των ορυκτών και των ουδέτερων ως προς τον άνθρακα καυσίμων εκτιμάται ότι θα επηρεάσει τα στοιχεία αυτά. Εκτός από τα MBM, έχει προταθεί μια τεχνική απαίτηση, το πρότυπο καυσίμων GHG, που θέτει μια απαίτηση εκπομπών για την ενέργεια που δίνεται στα πλοία.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), μια άλλη σημαντική ρυθμιστική αρχή, στοχεύει στη μείωση των εκπομπών κατά 55% έως το 2030 σε σύγκριση με το 1990 και στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Τον Ιούλιο του 2021, η ΕΕ εισήγαγε τη νομοθετική δέσμη "Fit for 55" και τον κανονισμό FuelEU Maritime. Ο πρώτος αναμένεται να συμπεριλάβει τη ναυτιλία στο σύστημα εμπορίας εκπομπών της ΕΕ (EU ETS), ενώ ο δεύτερος επιδιώκει να προωθήσει τη χρήση βιώσιμων καυσίμων επιβάλλοντας απαίτηση έντασης αερίων θερμοκηπίου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής. Οι εν λόγω προτάσεις για τα συγκεκριμένα πλοία εγκρίθηκαν το 2023 [6].

1.3 Πράσινες τεχνολογίες

Στη σημερινή εποχή της αυξημένης περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης και των αυξανόμενων ρυθμιστικών κανονισμών, η ναυτιλιακή βιομηχανία, υπεύθυνη για τη μεταφορά σχεδόν του 90% του παγκόσμιου εμπορίου, βρίσκεται στο μεταίχμιο μιας μετασχηματιστικής εποχής. Αυτή η εξέλιξη δεν είναι απλώς μια τάση, αλλά μια αναγκαία στρατηγική επιβίωσης σε έναν κόσμο με αυξανόμενη οικολογική συνείδηση. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πράσινες τεχνολογίες αναδεικνύονται σε κρίσιμους παράγοντες αλλαγής, προσφέροντας μια πορεία προς τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κλάδου και την επίτευξη της βιωσιμότητας.

Στο πεδίο των τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας, τα προηγμένα συστήματα πλοήγησης και δρομολόγησης, όπως η δρομολόγηση με βάση τις καιρικές συνθήκες και η δυναμική βελτιστοποίηση της

ταχύτητας, έχουν επιδείξει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της βελτιστοποίησης των δρομολογίων και της ταχύτητας του πλοίου. Περαιτέρω, η τεχνολογία λίπανσης με αέρα (air lubrication technology), όπως το σύστημα λίπανσης με αέρα της Silverstream [7], δημιουργεί ένα χαλί από μικροσκοπικές φυσαλίδες κατά μήκος του κύτους του πλοίου, μειώνοντας την αντίσταση και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των καυσίμων.

Τα εναλλακτικά καύσιμα και οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας διερευνώνται εντατικά ως μέσο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία. Τα βιοκαύσιμα, που παράγονται από οργανικά υλικά και απόβλητα, έχουν δοκιμαστεί με επιτυχία από εταιρείες όπως η GoodFuels. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) υιοθετείται όλο και περισσότερο λόγω των χαμηλότερων εκπομπών θείου και άνθρακα, με εταιρείες όπως η Maersk να πρωτοπορούν με πλοία που κινούνται με LNG. Το υδρογόνο και η αμμωνία είναι επίσης πολλά υποσχόμενα καύσιμα μηδενικού άνθρακα που εξετάζονται για τη μελλοντική ναυτιλία. Επιπλέον, αξιοποιείται το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με τεχνολογίες πρόωσης με τη βοήθεια του ανέμου, όπως τα πανιά με ρότορα της Norsepower και τα συστήματα ηλιακής ενέργειας που εγκαθίστανται σε όλο και περισσότερα πλοία [8].

Στο μέτωπο του σχεδιασμού των πλοίων, συναντάμε πράσινες τεχνολογίες που αποσκοπούν στη μείωση της αντίστασης και την αύξηση της αποδοτικότητας. Για παράδειγμα, καινοτόμες επιστρώσεις κύτους, όπως αυτές που αναπτύχθηκαν από την AkzoNobel [9], μειώνουν την αντίσταση του νερού, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα των καυσίμων. Εταιρείες όπως η ABB και η Wärtsilä προσφέρουν προηγμένες λύσεις πρόωσης, όπως η ηλεκτρική πρόωση Aziprod® [10] και οι προπέλες εξοικονόμησης ενέργειας, που βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση και μειώνουν τις εκπομπές.

Επιπλέον, με στόχο τον περιορισμό της ρύπανσης των ωκεανών, ο κλάδος αξιοποιεί προηγμένες τεχνολογίες διαχείρισης αποβλήτων. Εξελιγμένα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων, όπως οι ολοκληρωμένες λύσεις διαχείρισης αποβλήτων της EVAC, διαχειρίζονται όλους τους τύπους αποβλήτων που παράγονται από πλοία. Τα συστήματα διαχείρισης υδάτινου έρματος, όπως αυτά που ανέπτυξε η Alfa Laval, αποτρέπουν την εξάπλωση επιβλαβών υδρόβιων ειδών καθώς, επεξεργάζονται και καθαρίζουν το νερό στο πλοίο πριν από την απόρριψή του, διασφαλίζοντας ότι τα θαλάσσια οικοσυστήματα παραμένουν αδιατάρακτα. Το επίκεντρο των συστημάτων όπως αυτό της Alfa Laval είναι η διατήρηση της ισορροπίας της θαλάσσιας βιοποικιλότητας μέσω του φιλτραρίσματος και της επεξεργασίας του έρματος, προστατεύοντας έτσι τους ωκεανούς μας από εισβολικά είδη και εξασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τους διεθνείς κανονισμούς και πρότυπα. Τεχνολογίες καθαρισμού, όπως αυτές της Yara Marine, χρησιμοποιούνται για τη μείωση των εκπομπών SOx από τα καυσαέρια των πλοίων [11]. Τα συστήματα

αυτά, που συχνά αποκαλούνται "συστήματα καθαρισμού καυσαερίων", διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην υποστήριξη της ναυτιλιακής βιομηχανίας για την τήρηση των αυστηρών κανονισμών του IMO για τις εκπομπές ρύπων, εξασφαλίζοντας ένα καθαρότερο θαλάσσιο περιβάλλον και μετριάζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ναυτιλιακών εργασιών.

Κάθε τεχνολογία σε αυτές τις κατηγορίες παρουσιάζει ένα μοναδικό σύνολο ευκαιριών και προκλήσεων και η υιοθέτησή της εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ειδικών αναγκών του πλοίου, των λειτουργιών του και των εκτιμήσεων κόστους. Στην παρούσα εργασία, θα πραγματοποιήσουμε μια βαθιά «κατάδυση» σε αυτές τις πράσινες τεχνολογίες, εξετάζοντας τις δυνατότητες, τις προκλήσεις και τον κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζουν στη μετάβαση του κλάδου στην πράσινη ναυτιλία.

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση πράσινων τεχνολογιών στα πλοία αποτελεί βασικό μοχλό για τη μετατροπή της ναυτιλιακής βιομηχανίας σε έναν βιώσιμο, φιλικό προς το περιβάλλον τομέα. Συμβάλλουν καθοριστικά στην περιβαλλοντική υπευθυνότητα και προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας των θαλάσσιων μεταφορών. Όπως θα καταδειχθεί στα επόμενα κεφάλαια, οι τεχνολογίες αυτές αποτελούν κάτι περισσότερο από μια απλή ανταπόκριση στις κανονιστικές υποχρεώσεις - σηματοδοτούν μια στρατηγική επιλογή για τις έτοιμες για το μέλλον εταιρείες που επιδιώκουν να πλοηγηθούν στο μελλοντικό τοπίο της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

1.4 Μελλοντικά σενάρια για τη ναυτιλία

Κοιτάζοντας προς το μέλλον, η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται στο κατώφλι ενός σημαντικού μετασχηματισμού, καθώς κατευθύνεται προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον. Μέχρι το 2050, το τοπίο της παγκόσμιας ναυτιλίας προβλέπεται να είναι ριζικά διαφορετικό, λόγω της συμβολής της τεχνολογικής καινοτομίας, των ρυθμιστικών κανονισμών και της μεταβαλλόμενης δυναμικής της αγοράς. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει θέσει ως στόχο τη μείωση των συνολικών ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου του κλάδου κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050 σε σύγκριση με το 2008, ωθώντας τον κλάδο προς την ουσιαστική απεξάρτηση από τον άνθρακα [12].

Οι εξελίξεις στις πράσινες τεχνολογίες θα διαδραματίσουν αναμφίβολα κρίσιμο ρόλο στην επίτευξη αυτών των στόχων. Αναμένεται ότι μέχρι το 2050, ο στόλος των πλοίων παγκοσμίως θα κυριαρχείται από πλοία που θα κινούνται με εναλλακτικά καύσιμα, όπως βιοκαύσιμα, υδρογόνο, αμμωνία και LNG, παράλληλα με λύσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Η ενσωμάτωση μέτρων ενεργειακής απόδοσης θα γίνει επίσης ο κανόνας και όχι η εξαίρεση, με προηγμένα

συστήματα πλοήγησης, τεχνολογίες λίπανσης με αέρα και καινοτόμους σχεδιασμούς κύτους και προπέλας να αποτελούν στάνταρ χαρακτηριστικά [13].

Η ψηφιοποίηση και η τεχνητή νοημοσύνη θα φέρουν περαιτέρω επανάσταση στον κλάδο, επιτρέποντας την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για βελτιστοποιημένες λειτουργίες και προληπτική συντήρηση, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές. Τα αυτόνομα πλοία ενδέχεται να γίνουν ένα συνηθισμένο θέαμα, ενισχύοντας σημαντικά την επιχειρησιακή αποδοτικότητα.

Ωστόσο, η πορεία προς το 2050 δεν θα είναι χωρίς προκλήσεις. Η μετάβαση στην πράσινη ναυτιλία απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη, υποδομές και κατάρτιση δεξιοτήτων. Απαιτεί επίσης στενή συνεργασία μεταξύ διαφόρων ενδιαφερόμενων φορέων, συμπεριλαμβανομένων των πλοιοκτητών, των παροχών τεχνολογίας, των ρυθμιστικών αρχών και των φορέων χάραξης πολιτικής [14].

Εν όψει αυτών των προκλήσεων, είναι πιθανό να προκύψουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα και μηχανισμοί χρηματοδότησης για τη διευκόλυνση και την παροχή κινήτρων για την πράσινη μετάβαση. Η τιμολόγηση του διοξειδίου του άνθρακα ή τα μέτρα που βασίζονται στην αγορά ενδέχεται να εφαρμοστούν ευρέως, προσθέτοντας οικονομικά κίνητρα στις περιβαλλοντικές υποχρεώσεις.

Συνοπτικά, η ζήτηση για θαλάσσιες μεταφορές αναμένεται να αυξηθεί κατά 60% έως το 2050, με την πιο ισχυρή αύξηση να σημειώνεται πριν από το 2030 και κυρίως στους τομείς των εμπορευματοκιβωτίων, του χύδην φορτίου και του φυσικού αερίου [13]. Η αύξηση αυτή αναμένεται να είναι πιο σημαντική στην Ασία και την Αφρική. Ενώ ο θαλάσσιος στόλος θα επεκταθεί, η ψηφιοποίηση και η βελτιωμένη αξιοποίηση θα διατηρήσουν την ανάπτυξή του βραδύτερη από την αύξηση του εμπορίου.

Το αποτύπωμα άνθρακα της ενέργειας που απαιτείται για τις μεταφορές θα μειωθεί έως το 2050, με σχεδόν το ήμισυ της ενέργειας της ναυτιλίας να παρέχεται από καύσιμα που δεν βασίζονται στο πετρέλαιο. Για τη διαχείριση του κινδύνου και την αξιολόγηση της μελλοντικής ανταγωνιστικότητας και κερδοφορίας εν μέσω σημαντικής αβεβαιότητας, εισήχθη το πλαίσιο "carbon robust ship" [15].

Ο όρος "robust ship" δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένο τύπο πλοίου στη ναυτιλιακή ορολογία. Ωστόσο, στο πλαίσιο των συζητήσεων γύρω από τη βιωσιμότητα, τις περιβαλλοντικές ανησυχίες και τους μεταβαλλόμενους κανονισμούς στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ένα "στιβαρό πλοίο" μπορεί να ερμηνευθεί ως ένα πλοίο σχεδιασμένο και εξοπλισμένο ώστε να ανταποκρίνεται τόσο στα τρέχοντα όσο και στα προβλέψιμα μελλοντικά πρότυπα και προκλήσεις.

Ένα "στιβαρό πλοίο" όπως φαίνεται στην εικόνα 4 σε αυτό το πλαίσιο θα έχει την ευελιξία να προσαρμόζεται στα μεταβαλλόμενα πρότυπα καυσίμων, θα διαθέτει συστήματα για την ελαχιστοποίηση των εκπομπών, θα είναι αποδοτικό στις λειτουργίες του και θα μπορούσε επίσης να ενσωματώνει τεχνολογία για τη μείωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος. Επιπλέον, θα έχει την ανθεκτικότητα να διαχειρίζεται τις αλλαγές στους ναυτιλιακούς κανονισμούς και την απρόβλεπτη ζήτηση της παγκόσμιας αγοράς.

Σε ορισμένα έγγραφα, όπως αυτά του DNV GL, έχει χρησιμοποιηθεί ο όρος "ανθεκτικός στον άνθρακα". Αυτός αναφέρεται σε πλοία που όχι μόνο πληρούν αλλά είναι προετοιμασμένα να υπερβούν τους τρέχοντες και επερχόμενους στόχους μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, εξασφαλίζοντας την ανταγωνιστικότητά τους σε μια μελλοντική ναυτιλιακή αγορά χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [16].

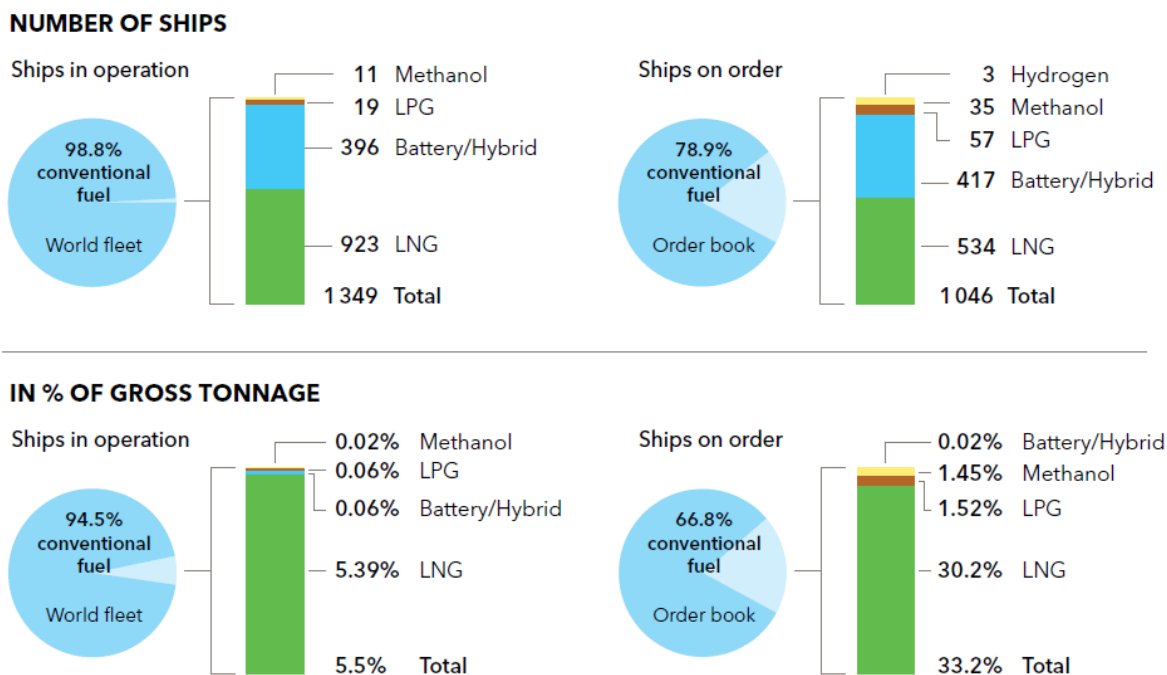


Εικόνα 4: Robust ships για την πλοήγηση στην ενεργειακή μετάβαση [17]

Τα εμπόδια στην υιοθέτηση καυσίμων χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα στη ναυτιλία περιλαμβάνουν υψηλότερες αρχικές επενδύσεις, περιορισμένη διαθεσιμότητα καυσίμων, ανεπαρκή παγκόσμια υποδομή δεξαμενισμού, αυξημένες τιμές καυσίμων και αυξημένες απαιτήσεις αποθήκευσης

επί του πλοίου. Ο αντίκτυπος αυτών των εμποδίων διαφέρει μεταξύ των καυσίμων. Η ασφάλεια είναι υψίστης σημασίας και η έλλειψη συγκεκριμένων κανονισμών καθιστά την εφαρμογή νέων τεχνολογιών πρόκληση. Η καταλληλότητα και η οικονομική σκοπιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων εξαρτώνται από τον τύπο και το εμπόριο του πλοίου.

Τα παρακάτω στοιχεία προέρχονται από το DNV Maritime Forecast 2050 [10] μια έγκυρη πηγή δεδομένων σχετικά με την υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων στα πλοία (εικόνα 5).



Key: Liquefied natural gas (LNG); liquefied petroleum gas (LPG)
Sources: IHSMarkit (ihsmarkit.com) and DNV's Alternative Fuels Insights for the shipping industry - AFI platform (afi.dnv.com)

Εικόνα 5: Πρόσληψη εναλλακτικών καυσίμων στον παγκόσμιο στόλο ανά αριθμό πλοίων και ολική χωρητικότητα [4]

Από τον Ιούνιο του 2022, το 5.5% των εν λειτουργία πλοίων και το 33% των πλοίων υπό παραγγελία χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα. Σε αριθμούς, αυτό μεταφράζεται σε 1.2% των εν ενεργεία πλοίων και 21% των πλοίων υπό παραγγελία, δηλαδή 1.046 από τα 4.967 πλοία υπό παραγγελία μπορούν να χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα. Η μπαταρία/υβριδικό σύστημα και το ΥΦΑ είναι τα κύρια εναλλακτικά καύσιμα, με την μπαταρία/υβριδικό σύστημα να προορίζεται κυρίως για μικρότερα πλοία. Από τα 923 πλοία που χρησιμοποιούν ΥΦΑ, τα 630 είναι πλοία μεταφοράς ΥΦΑ και τα 293 είναι άλλοι τύποι. Η υιοθέτηση της μεθανόλης και του υγραερίου αυξάνεται, μαζί με τα αρχικά πλοία που

λειτουργούν με υδρογόνο. Πολλά πλοία με δυνατότητες εναλλακτικών καυσίμων χρησιμοποιούν επίσης συμβατικά καύσιμα.

Το ΥΦΑ είναι δημοφιλές μεταξύ των μεγαλύτερων πλοίων, όπως τα πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα δεξαμενόπλοια και τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου. Σύμφωνα με τα στοιχεία, 1.046 πλοία υπό παραγγελία χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα: 167 είναι πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, 367 είναι άλλα πλοία με καύσιμο υγροποιημένο φυσικό αέριο και 417 χρησιμοποιούν μπαταρία/υβριδική πρόωση. Η μεθανόλη επιλέγεται κυρίως ως καύσιμο για τα δεξαμενόπλοια, αλλά η υιοθέτησή της στο τμήμα των εμπορευματοκιβωτίων επίσης αυξάνεται. Η αμμωνία ως καύσιμο παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, αλλά εμποδίζεται από τις μη ώριμες τεχνολογίες μετατροπής, κάτι που αναμένεται να αλλάξει σύντομα. 76 πλοία μεταφοράς υγραερίου που χρησιμοποιούν υγραέριο ως καύσιμο είναι σε λειτουργία ή υπό παραγγελία.

1.5 Μετάβαση υπάρχοντος πλοίου σε «πράσινο» πλοίο

Η εφαρμογή εναλλακτικών καυσίμων και πράσινων τεχνολογιών σε ένα υπάρχον πλοίο είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Απαιτεί βαθιά κατανόηση των συστημάτων του πλοίου, λεπτομερή σχεδιασμό και ενδεχομένως σημαντικές τροποποιήσεις στη δομή και τα συστήματα του πλοίου. Τα βασικά βήματα που απαιτούνται για μια τέτοια μετάβαση είναι τα εξής:

1.5.1 Αξιολόγηση των υφιστάμενων συστημάτων και υποδομών

Το πρώτο βήμα κατά την εξέταση οποιασδήποτε μετάβασης σε εναλλακτικά καύσιμα και τεχνολογίες είναι η αξιολόγηση των υφιστάμενων συστημάτων και υποδομών επί του πλοίου. Αυτό περιλαμβάνει το σύστημα πρόωσης, τα συστήματα αποθήκευσης και παροχής καυσίμων, τα ηλεκτρικά συστήματα και τυχόν βοηθητικά συστήματα που ενδέχεται να επηρεαστούν από την αλλαγή.

Για παράδειγμα, εάν ένα πλοίο τροφοδοτείται σήμερα από πετρελαιοκινητήρα, πόσο εύκολο ή δύσκολο θα ήταν να αντικατασταθεί ο κινητήρας αυτός με ένα σύστημα κυψελών καυσίμου ή ένα ηλεκτρικό σύστημα που τροφοδοτείται από μπαταρίες; Ποιες αλλαγές θα πρέπει να γίνουν στο κύτος του πλοίου για να φιλοξενήσει αυτά τα νέα συστήματα; Ποιες αλλαγές μπορεί να είναι απαραίτητες όσον αφορά τα συστήματα εξαερισμού, ψύξης και ασφάλειας;

1.5.2 Μελέτη σκοπιμότητας

Αφού αξιολογηθούν διεξοδικά τα υφιστάμενα συστήματα, θα πρέπει να διεξαχθεί μελέτη σκοπιμότητας για την αξιολόγηση της πρακτικότητας των προβλεπόμενων αλλαγών. Η μελέτη αυτή θα πρέπει να εξετάζει τις τεχνικές προκλήσεις, το εκτιμώμενο κόστος, τα πιθανά οφέλη και τις κανονιστικές απαιτήσεις.

Για παράδειγμα, εάν ένα πλοίο εξετάζει τη μετάβαση από καύσιμο ντίζελ σε υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), η μελέτη σκοπιμότητας θα πρέπει να εξετάζει τη διαθεσιμότητα του LNG στους τυπικούς λιμένες προσέγγισης του πλοίου, το κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος καυσίμου LNG, τις πιθανές μειώσεις στις εκπομπές και το κόστος καυσίμου και τις κανονιστικές απαιτήσεις για ένα πλοίο που λειτουργεί με καύσιμο LNG. Η μελέτη θα μπορούσε επίσης να εξετάσει εναλλακτικές επιλογές, όπως τα βιοκαύσιμα ή οι κυψέλες καυσίμου, ώστε να διασφαλιστεί ότι θα επιλεγεί η καταλληλότερη επιλογή.

1.5.3 Σχεδιασμός

Εάν η μελέτη σκοπιμότητας καθορίσει ότι η μετάβαση είναι βιώσιμη και επιθυμητή, το επόμενο βήμα είναι η λεπτομερής εργασία για τον σχεδιασμό των νέων συστημάτων και των τροποποιήσεων του πλοίου.

Στην περίπτωση της μετάβασης σε υγροποιημένο φυσικό αέριο, για παράδειγμα, αυτό θα περιλάμβανε το σχεδιασμό των δεξαμενών αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου, του συστήματος παροχής καυσίμου, των τροποποιημένων ή νέων κινητήρων και των συναφών συστημάτων, όπως τα συστήματα εξαερισμού και ασφάλειας. Η διαδικασία σχεδιασμού θα πρέπει να εξετάσει όχι μόνο τις τεχνικές απαιτήσεις, αλλά και τις λειτουργικές απαιτήσεις - για παράδειγμα, πόσο καιρό μπορεί να λειτουργεί το πλοίο μεταξύ των ανεφοδιασμών και πώς θα συντηρούνται τα νέα συστήματα.

1.5.4 Ρυθμιστική έγκριση και πιστοποίηση

Προτού γίνουν οποιεσδήποτε αλλαγές στο πλοίο, τα σχέδια και οι τροποποιήσεις πρέπει να εγκριθούν από τους αρμόδιους ρυθμιστικούς φορείς. Αυτό σημαίνει την υποβολή λεπτομερών σχεδίων και τεκμηρίωσης και ενδεχομένως την υποβολή σε επιθεωρήσεις ή δοκιμές.

Για παράδειγμα, εάν ένα πλοίο μεταβαίνει σε υγροποιημένο φυσικό αέριο, τα σχέδια θα πρέπει να εγκριθούν από τον νηογνώμονα (όπως ο Lloyd's Register ή ο DNV GL) και το κράτος σημαίας του πλοίου. Το πλοίο θα πρέπει επίσης να πληροί τις απαιτήσεις του Διεθνούς Κώδικα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού για πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης (Κώδικας IGF).

1.5.5 Εφαρμογή και δοκιμή

Μόλις εγκριθούν τα σχέδια, οι αλλαγές μπορούν να εφαρμοστούν. Αυτό προβλέπει μια περίοδο σε ξηρό ντόκο, όπου το πλοίο τίθεται εκτός λειτουργίας και πραγματοποιούνται οι αλλαγές. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αφαίρεση των παλαιών κινητήρων και την εγκατάσταση νέων, την εγκατάσταση νέων συστημάτων αποθήκευσης και παροχής καυσίμων, την τροποποίηση του κύτους ή της υπερκατασκευής και την εγκατάσταση νέων συστημάτων ασφαλείας.

Αφού γίνουν οι αλλαγές, το πλοίο θα υποβληθεί σε περίοδο δοκιμών και θέσης σε λειτουργία. Αυτό γίνεται για να διασφαλιστεί ότι τα νέα συστήματα λειτουργούν σωστά και με ασφάλεια και για να εκπαιδευτεί το πλήρωμα στη λειτουργία και τη συντήρησή τους.

1.5.6 Λειτουργία και συντήρηση

Μόλις το πλοίο τεθεί ξανά σε λειτουργία, τα νέα συστήματα θα πρέπει να λειτουργούν και να συντηρούνται. Νέες διαδικασίες και ενδεχομένως νέα εκπαίδευση θα ακολουθήσει για το πλήρωμα. Θα περιλαμβάνει επίσης την παρακολούθηση της απόδοσης των νέων συστημάτων, ώστε να διασφαλιστεί ότι αποδίδουν τα αναμενόμενα οφέλη και να εντοπιστούν τυχόν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν.

Εν κατακλείδι, η μετάβαση ενός υπάρχοντος πλοίου σε εναλλακτικά καύσιμα και τεχνολογίες είναι ένα σημαντικό εγχείρημα. Περιλαμβάνει προσεκτική αξιολόγηση των υφιστάμενων συστημάτων, λεπτομερή μελέτη σκοπιμότητας, εκτεταμένο σχεδιασμό και σχεδίαση, κανονιστική έγκριση και προσεκτική εφαρμογή και δοκιμή. Ωστόσο, με προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση, μπορεί να αποτελέσει έναν αποτελεσματικό τρόπο για τη μείωση των εκπομπών, τη μείωση του κόστους των καυσίμων και τη βελτίωση της βιωσιμότητας της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Το κεφάλαιο αυτό έχει ως στόχο να φωτίσει τις δυνατότητες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) να φέρουν επανάσταση στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Το ταξίδι προς τη βιώσιμη ναυτιλία είναι γεμάτο προκλήσεις, αλλά επίσης βρίθει ευκαιριών - και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν μερικές από τις πιο ελπιδοφόρες δυνατότητες για ένα καθαρό, πράσινο μέλλον στις θαλάσσιες μεταφορές. Οι γνώσεις που θα αποκομιστούν από αυτή τη διερεύνηση θα είναι καθοριστικές για την κατανόηση της μελλοντικής πορείας της ναυτιλιακής βιομηχανίας, καθώς αυτή πλοηγείται προς τον ορίζοντα της βιωσιμότητας.

2.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια (solar energy) αποτελεί μια από τις πιο υποσχόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Έχει τη δυνατότητα να παράγει σημαντική ποσότητα ενέργειας για τα πλοία, μειώνοντας την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και συνακόλουθα τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [18].

2.1.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

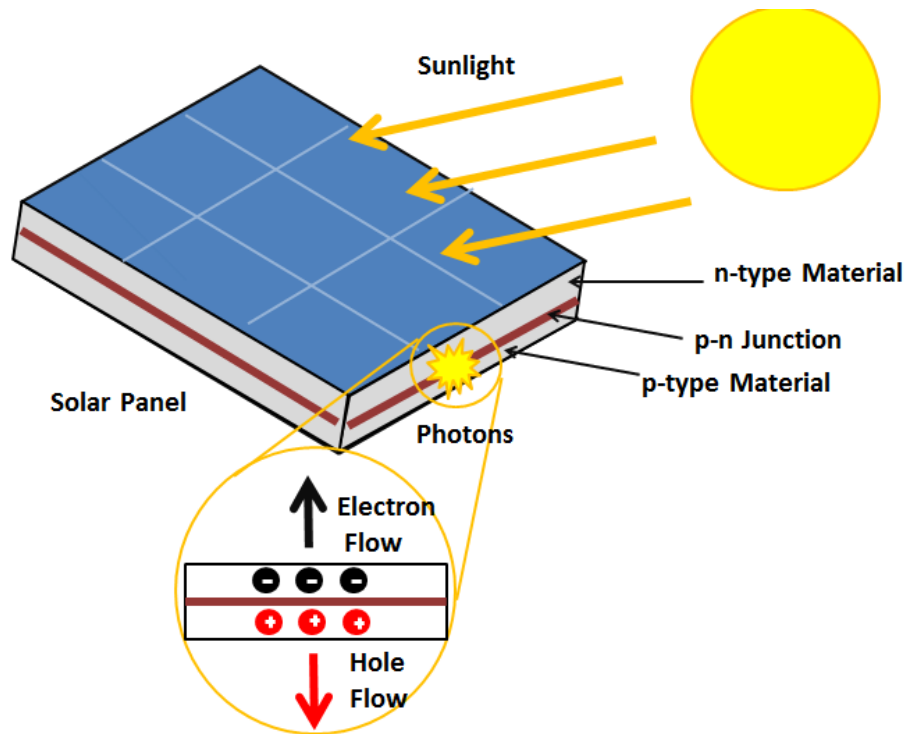
Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι διεθνείς κανονισμοί που να στοχεύουν στη χρήση της ηλιακής ενέργειας στα πλοία. Ωστόσο, το ευρύτερο πλαίσιο του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (ΙΜΟ) που προωθεί την ενεργειακή απόδοση και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παρέχει ένα ενθαρρυντικό περιβάλλον για την υιοθέτηση της ηλιακής ενέργειας. Η αρχική στρατηγική του ΙΜΟ για τα αέρια του θερμοκηπίου στοχεύει στη μείωση κατά τουλάχιστον 50% των συνολικών ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία έως το 2050. Ένας τέτοιος στόχος προωθεί έμμεσα τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής ενέργειας. Ορισμένες χώρες μπορεί να έχουν ειδικές εθνικές πολιτικές που ενθαρρύνουν τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά ο τομέας παραμένει σε μεγάλο βαθμό αυτοτροφοδοτούμενος όσον αφορά την υιοθέτηση της ηλιακής ενέργειας.

2.1.2 Αρχή λειτουργίας

Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται με τη χρήση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) κυψελών, συνήθως συναρμολογημένων σε πάνελ. Τα στοιχεία αυτά μετατρέπουν το ηλιακό φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου, κατά το οποίο η απορρόφηση του φωτός δημιουργεί τάση σε ένα υλικό, οδηγώντας στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Το παραγόμενο συνεχές ρεύμα (DC)

μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) χρησιμοποιώντας μετατροπείς για να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρική ενέργεια.

Το φωτοβολταϊκό (ΦΒ) φαινόμενο όπως φαίνεται στην εικόνα 6 είναι μια διαδικασία κατά την οποία δύο υλικά αντιδρούν στο ηλιακό φως (ή σε άλλες μορφές φωτός) για να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 6: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [19]

Ακολουθεί μια πιο λεπτομερής ανάλυση:

Απορρόφηση του φωτός: Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει σε μια ηλιακή κυψέλη, η οποία συνήθως αποτελείται από πυρίτιο, εκπέμπει σωματίδια φωτός γνωστά ως φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μεταφέρει ένα ορισμένο ποσό ενέργειας που αντιστοιχεί στα διάφορα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος.

Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών: Καθώς αυτά τα φωτόνια απορροφώνται από το κύτταρο, η ενέργειά τους μεταφέρεται σε ηλεκτρόνια στο πυρίτιο. Η ενέργεια από τα φωτόνια ουσιαστικά "βγάζει" τα ηλεκτρόνια από την τρέχουσα θέση τους, αφήνοντας πίσω τους αυτό που ονομάζεται "οπές".

Ροή ηλεκτρικού ρεύματος: Μόλις απελευθερωθούν τα ηλεκτρόνια, στη συνέχεια οδηγούνται ως ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, για να κινηθούν

τα ηλεκτρόνια προς μια συνεκτική κατεύθυνση (και να δημιουργήσουν έτσι ένα αξιοποιήσιμο ρεύμα), πρέπει να υπάρχει ένα εγκατεστημένο ηλεκτρικό πεδίο εντός του ηλιακού στοιχείου.

Δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου: Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται με τη χρήση διαφορετικών υλικών. Συνήθως, ένα ηλιακό στοιχείο αποτελείται από δύο τύπους πυριτίου: τύπου n (έχει επιπλέον ηλεκτρόνια) και τύπου p (έχει επιπλέον οπές). Όταν αυτοί οι δύο τύποι πυριτίου έρχονται σε επαφή, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια από τον τύπο n ρέουν για να γεμίσουν τις οπές στον τύπο p, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο στη διασταύρωση μεταξύ αυτών των δύο υλικών. Αυτό το πεδίο οδηγεί τα νεοαπελευθερωμένα ηλεκτρόνια προς το μπροστινό μέρος του ηλιακού στοιχείου και τις οπές προς το πίσω μέρος, δημιουργώντας ένα κατευθυνόμενο ρεύμα.

Εξαγωγή ρεύματος: Οι αγώγιμες μεταλλικές πλάκες στις πλευρές της κυψέλης συλλέγουν τα ηλεκτρόνια και τα μεταφέρουν σε καλώδια, παρέχοντας έτσι ρεύμα σε αξιοποιήσιμη μορφή.

2.1.3 Εκπομπές ρύπων

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας είναι η μη ρυπογόνος φύση της. Δεν εκπέμπει επιβλαβείς ρύπους ή αέρια του θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία της, γεγονός που την καθιστά ιδανική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για μια βιομηχανία απαλλαγής από τον άνθρακα. Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να αναγνωρίσουμε ότι η διαδικασία κατασκευής των ηλιακών συλλεκτών έχει περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αν και σημαντικά χαμηλότερο από εκείνο των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων.

2.1.4 Ενεργειακή απόδοση

Η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών, δηλαδή το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, βελτιώνεται συνεχώς με την πάροδο των ετών. Οι μέσοι εμπορικοί ηλιακοί συλλέκτες λειτουργούν με απόδοση περίπου 15-20%. Αν και αυτό είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με το ενεργειακό περιεχόμενο των ορυκτών καυσίμων, η απεριόριστη και ελεύθερα διαθέσιμη φύση της ηλιακής ακτινοβολίας αντισταθμίζει αυτή τη χαμηλότερη απόδοση. Επιπλέον, οι εξελίξεις στην τεχνολογία αναμένεται να αυξήσουν περαιτέρω την απόδοση αυτή τα επόμενα χρόνια.

2.1.5 Εφαρμογή σε πλοία

Οι ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να εγκατασταθούν στο κατάστρωμα ή στην υπερκατασκευή ενός πλοίου. Για τα υπάρχοντα πλοία, πρόκειται για ένα πρόσθετο σύστημα που μπορεί να τοποθετηθεί εκ των υστέρων για την παροχή βοηθητικής ενέργειας, μειώνοντας το φορτίο της κύριας μηχανής και εξοικονομώντας έτσι καύσιμα. Στα νέα πλοία, οι σχεδιαστές έχουν μεγαλύτερη ευελιξία και μπορούν να δημιουργήσουν εξ αρχής τους βέλτιστους χώρους για την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών. Η

παραγόμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, από την τροφοδοσία των ηλεκτρικών συστημάτων του πλοίου έως τη συμβολή στην πρόωση του πλοίου σε υβριδικά συστήματα.

Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι το σύστημα "Aqua superPower", το οποίο συνδυάζει ηλιακή ενέργεια και ενέργεια από μπαταρίες για την υβριδική πρόωση πορθμείων υψηλής ταχύτητας και σκαφών αναψυχής. Ένα άλλο είναι το σύστημα "EnergySail" της Eco Marine Power, το οποίο ενσωματώνει άκαμπτα πανιά και ηλιακούς συλλέκτες, επιτρέποντας στα πλοία να αξιοποιούν ταυτόχρονα την αιολική και την ηλιακή ενέργεια [20].

Aqua superPower

Ημερομηνία εφαρμογής: 2023.

Λειτουργία: Σε πλοία για κρουαζιέρες και ερευνητικές αποστολές.

Κατασκευή: Νέα κατασκευή, ειδικά σχεδιασμένη με ένα μείγμα ηλεκτρικής πρόωσης και ηλιακής υποστήριξης.

Προδιαγραφές: Αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ: 5.000 πάνελ που κατανέμονται στο πάνω κατάστρωμα και σε τμήματα των πλευρικών κιγκλιδωμάτων.

Παραγωγή ενέργειας: Κάθε πάνελ παράγει περίπου 280W, με συνολική δυνητική παραγωγή είναι 1,4 MW.

EnergySail από την Eco Marine Power

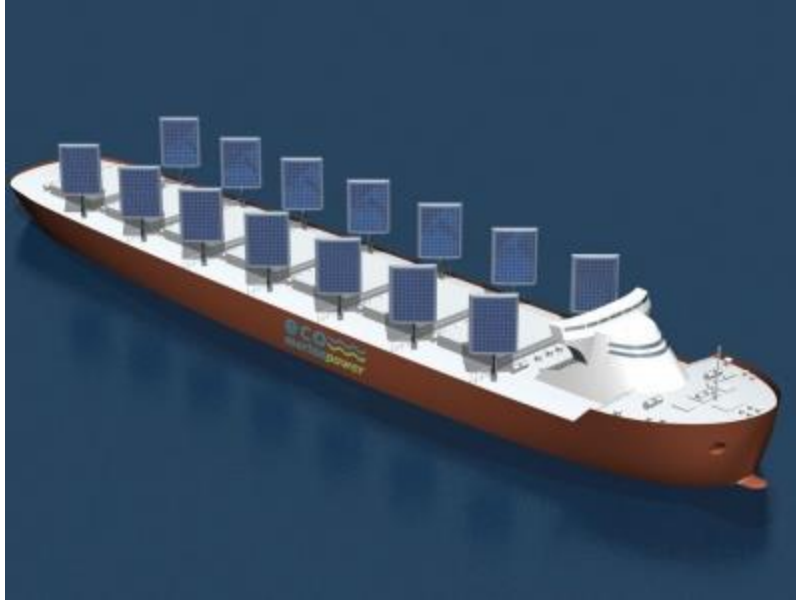
Ημερομηνία εφαρμογής: Οι πρακτικές εφαρμογές θα αρχίσουν από το 2020.

Λειτουργία: Το σύστημα EnergySail δεν συνδέεται με συγκεκριμένη διαδρομή, αλλά είναι μια τεχνολογία που μπορεί να ενσωματωθεί σε διάφορα πλοία..

Κατασκευή: Τόσο νέες κατασκευές όσο και μετασκευές υφιστάμενων πλοίων.

Προδιαγραφές: Το σύστημα EnergySail ενσωματώνει άκαμπτα πανιά και ηλιακούς συλλέκτες. Ο ακριβής αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαϊσίων εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου και τον αριθμό των εγκατεστημένων EnergySails.

Παραγωγή ενέργειας: Υποθέτοντας ότι κάθε πανί EnergySail μπορεί να φιλοξενήσει 100 πάνελ των 250W το καθένα, υπολογίζεται ότι ένα πανί θα παρήγαγε 25 kW. Συνεπώς, ένα πλοίο με 10 EnergySails θα παρήγαγε 250 kW.



Εικόνα 7: Η Eco Marine Power ολοκληρώνει το σχεδιασμό του EnergySail [20]

Solar Voyager

Ημερομηνία εφαρμογής: 2024.

Λειτουργία: Κυρίως στον Ατλαντικό Ωκεανό, χρησιμεύοντας ως εκπαιδευτικό σκάφος και πλατφόρμα έρευνας για τη βιωσιμότητα.

Κατασκευή: Νέα κατασκευή με έμφαση στις μηδενικές εκπομπές και τις βιώσιμες τεχνολογίες.

Προδιαγραφές: Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων: 4.000 πάνελ ενσωματωμένα στο σχεδιασμό του πλοίου.

Παραγωγή ενέργειας: Η συνολική δυναμική παραγωγή ανέρχεται σε 1,2 MW.

Συμπερασματικά, η ηλιακή ενέργεια προσφέρει μια καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για τα πλοία και μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχίζουν να αυξάνουν την αποδοτικότητα και να μειώνουν το κόστος των συστημάτων ηλιακής ενέργειας, η υιοθέτησή τους στη ναυτιλία πρόκειται να γίνει με γρηγορότερους ρυθμούς. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την αυστηροποίηση των παγκόσμιων κανονισμών για τις εκπομπές ρύπων, τοποθετεί την ηλιακή ενέργεια στην πρώτη γραμμή της πράσινης ναυτιλίας.

2.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια (wind energy), που κάποτε αποτελούσε την αρχική πηγή πρόωσης για τα θαλάσσια ταξίδια, επανεξετάζεται τώρα ως βιώσιμη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας στη σύγχρονη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αξιοποιώντας τον άφθονο και δωρεάν πόρο του ανέμου, ο ναυτιλιακός τομέας υιοθετεί εκ νέου τις τεχνολογίες που υποστηρίζονται από τον άνεμο για να μετριάσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να συμμορφωθεί με τα αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών [21].

2.2.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Όπως και με την ηλιακή ενέργεια, δεν υπάρχουν επί του παρόντος σαφείς διεθνείς κανονισμοί σχετικά με τη χρήση της αιολικής ενέργειας στα πλοία. Ωστόσο, το ευρύ ρυθμιστικό πλαίσιο που έχει θέσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προωθεί έμμεσα την ενσωμάτωση λύσεων αιολικής ενέργειας. Ο φιλόδοξος στόχος του IMO ενθαρρύνει την ανάπτυξη και την υιοθέτηση τεχνολογιών που υποστηρίζονται από τον άνεμο.

2.2.2 Αρχή λειτουργίας

Τα συστήματα πρόωσης με τη βοήθεια του ανέμου αξιοποιούν τη δύναμη του ανέμου για να παρέχουν ώθηση προς τα εμπρός στο πλοίο. Οι κύριοι τύποι τεχνολογιών πρόωσης με τον άνεμο περιλαμβάνουν πανιά (μαλακά και σκληρά), χαρταετούς, ρότορες (με βάση την αρχή Flettner) και φτερά. Για παράδειγμα, ένας ρότορας Flettner, ένας ψηλός, περιστρεφόμενος κύλινδρος, χρησιμοποιεί το φαινόμενο Magnus για να παράγει μια δύναμη ανύψωσης κάθετα προς τη διεύθυνση του ανέμου, παρέχοντας ώθηση στο πλοίο. Τα συστήματα πρόωσης με τη βοήθεια του ανέμου, δύνανται να μειώσουν την απαιτούμενη ισχύ του κινητήρα στο ταξίδι, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων [22].

Ας εμβαθύνουμε στις διάφορες τεχνολογίες αιολικής ενέργειας για πλοία:

Μαλακά πανιά: Αυτά είναι τα παραδοσιακά υφασμάτινα πανιά που χρησιμοποιούνται εδώ και αιώνες. Οι σύγχρονες εκδόσεις μπορούν να αυτοματοποιηθούν και είναι κατασκευασμένες από προηγμένα υλικά που παρέχουν μεγαλύτερη αντοχή και αποτελεσματικότητα (εικόνα 8). Μπορούν να τυλίγονται ή να ξετυλίγονται ανάλογα με τις συνθήκες του ανέμου.

Σκληρά πανιά (ή πτερύγια): Πρόκειται για άκαμπτες, μη εύκαμπτες κατασκευές που λειτουργούν όπως τα φτερά ενός αεροπλάνου. Μπορούν να περιστρέφονται για να προσαρμόζονται στην κατεύθυνση του ανέμου και είναι πιο αποδοτικά από τα μαλακά πανιά. Η ακαμψία τους επιτρέπει την καλύτερη

βελτιστοποίηση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου. Τα σκληρά πανιά μπορούν επίσης να αποσυρθούν ή να προσαρμοστούν κατάλληλα για να ελαχιστοποιήσουν την αντίσταση όταν δεν χρησιμοποιούνται.

Kite-assisted SkySails: Ένα από τα εξέχοντα ονόματα στον τομέα της προώθησης χαρταετών, η SkySails ανέπτυξε μεγάλους, αυτοματοποιημένους χαρταετούς που πετούν μπροστά από το σκάφος (εικόνα 9). Αυτοί οι χαρταετοί μπορούν να φτάσουν σε μεγαλύτερα υψόμετρα, όπου οι άνεμοι είναι ισχυρότεροι και πιο σταθεροί. Οι χαρταετοί μπορούν να παρέχουν σημαντική πρόωση, ιδίως για μεσαία και μεγάλα σκάφη. Όταν δεν χρησιμοποιούνται, ανασύρονται και αποθηκεύονται. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να είναι συμπληρωματικό των παραδοσιακών μεθόδων πρόωσης.

Στροφείς Flettner Rotors: Εφευρέθηκαν από τον Anton Flettner τη δεκαετία του 1920 και είναι ψηλοί κυλινδρικοί ρότορες που τοποθετούνται στο κατάστρωμα του πλοίου (εικόνα 10). Όταν αυτοί οι ρότορες περιστρέφονται, εκμεταλλεύονται το φαινόμενο Magnus (μια δύναμη που δρα κάθετα στην επερχόμενη ροή αέρα) για να παρέχουν πρόωση. Ο περιστρεφόμενος ρότορας δημιουργεί μια διαφορά πίεσης, δημιουργώντας μια δύναμη ανύψωσης που ωθεί το πλοίο προς τα εμπρός. Οι σύγχρονες εκδόσεις χρησιμοποιούν προηγμένα υλικά και μπορούν να ενσωματωθούν σε σχέδια πλοίων ή να τοποθετηθούν εκ των υστέρων σε υπάρχοντα πλοία.

Πτερύγια: Ενώ τα πτερύγια συνήθως συνδέονται με ανεμογεννήτριες οι οποίες αναφέρονται ως ανεμογεννήτριες κάθετου ή οριζόντιου άξονα που τοποθετούνται σε πλοία. Αυτές οι ανεμογεννήτριες μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για χρήση επί του σκάφους. Ορισμένα καινοτόμα σχέδια προσπαθούν επίσης να αξιοποιήσουν την περιστροφική κίνησή τους για άμεση πρόωση, αν και αυτό είναι λιγότερο συνηθισμένο.



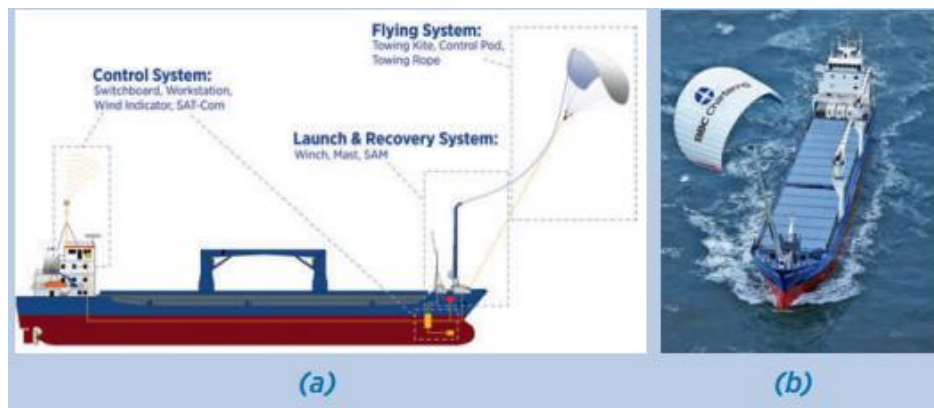
Εικόνα 8: Παραδείγματα πλοίων με τεχνολογία μαλακών ιστίων [22]



(a) UT Wind Challenge

(b) Oceanfoil

Εικόνα 9: Παραδείγματα πλοίων με τεχνολογία σταθερού πτερυγίου [22]



(a)

(b)

Εικόνα 10: Παραδείγματα πλοίων με τεχνολογία Kite-assisted skysails [22]



(a) Alcyone

(b) E-Ship 1

Εικόνα 10: Πλοία με τεχνολογία ρότορα (φαινόμενο Magnus) [22]

Η επιλογή μεταξύ αυτών των τεχνολογιών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος του πλοίου, η διαδρομή που ακολουθεί, οι επικρατούσες συνθήκες ανέμου και ο πρωταρχικός σκοπός του πλοίου. Για παράδειγμα, τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου μπορεί να επωφεληθούν περισσότερο από τους ρότορες Flettner, ενώ τα μικρότερα παράκτια πλοία μπορούν να αξιοποιήσουν τα μαλακά πανιά ή τους χαρταετούς. Η ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων αποσκοπεί στη μείωση της κατανάλωσης

καυσίμων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ευθυγραμμιζόμενη με την ώθηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας για πιο πράσινες λειτουργίες.

2.2.3 Εκπομπές ρύπων

Η αιολική ενέργεια είναι μια καθαρή και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και η χρήση της δεν παράγει επιβλαβείς εκπομπές ή ρύπους. Αυτή η λειτουργία χωρίς εκπομπές είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας, ιδίως στο πλαίσιο των στόχων της ναυτιλιακής βιομηχανίας για την απαλλαγή από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

2.2.4 Ενεργειακή απόδοση

Η αιολική ενέργεια δεν προορίζεται να αντικαταστήσει πλήρως τα συμβατικά συστήματα πρόωσης, αλλά μάλλον να τα συμπληρώσει. Ενώ η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται μέσω της αιολικής ενέργειας ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, ακόμη και μια μικρή μείωση της ώσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων με την πάροδο του χρόνου. Ως εκ τούτου, η απόδοση της αιολικής ενέργειας δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τα ορυκτά καύσιμα, αλλά θα πρέπει να εξετάζεται στο πλαίσιο της δυνατότητάς της να μειώσει τη συνολική κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων.

2.2.5 Εφαρμογή σε πλοία

Τα συστήματα αιολικής ενέργειας μπορούν να τοποθετηθούν εκ των υστέρων σε υπάρχοντα πλοία ή να ενσωματωθούν σε νέες κατασκευές. Η επιλογή της τεχνολογίας και η εφαρμογή της εξαρτάται από τον συγκεκριμένο τύπο πλοίου, το μέγεθος και το επιχειρησιακό προφίλ. Για παράδειγμα, το EnergySail της Eco Marine Power μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα ευρύ φάσμα πλοίων, από πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου έως πολεμικά πλοία. Η λύση Rotor Sail της Norsepower έχει εγκατασταθεί σε διάφορα πλοία, όπως το Pelican της Maersk και το Viking Grace της Viking Line [23].

Ακολουθούν μερικά αξιοσημείωτα έργα που αφορούν πλοία που κινούνται με αιολική ενέργεια:

E-Ship 1 (Enercon)

Ημερομηνία εφαρμογής: 2008

Λειτουργία: Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά εξοπλισμού ανεμογεννητριών σε όλο τον κόσμο για λογαριασμό της Enercon.

Κατασκευή: Νέα κατασκευή πλοίου.

Σύστημα: Χρησιμοποιεί τέσσερις μεγάλους ρότορες Flettner για την προώθηση και τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων.

Ενεργειακές πληροφορίες: Οι ρότορες δεν παράγουν ενέργεια, αλλά μπορούν να εξοικονομήσουν έως και 25% καυσίμου υπό βέλτιστες συνθήκες.

Vindskip (Lade AS)

Ημερομηνία εφαρμογής: Ο σχεδιασμός είναι σε εξέλιξη.

Λειτουργία: Προτείνεται σε φορτηγό πλοίο.

Κατασκευή: Νέα κατασκευή πλοίου.

Σύστημα: Χρησιμοποιεί ένα μοναδικό σχέδιο γάστρας που λειτουργεί σαν συμμετρική αεροτομή. Ο άνεμος, χτυπώντας το κύτος, δημιουργεί μια έλξη, βοηθώντας την πρόωση.

Ενεργειακές πληροφορίες: Το πλοίο αναμένεται να επιτύχει εξοικονόμηση καυσίμων έως και 60% και να μειώσει τις εκπομπές ρύπων κατά 80%.

Λύση Rotor Sail της Norsepower στο M/V Copenhagen (Scandlines)

Ημερομηνία εφαρμογής: Η εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε το 2018.

Λειτουργία: Λειτουργεί μεταξύ του Ροστόκ, Γερμανία, και του Γκέντσερ, Δανία.

Κατασκευή: Μετασκευή σε υπάρχον πλοίο.

Σύστημα: Χρησιμοποιεί πανί ρότορα Flettner.

Ενεργειακές πληροφορίες: Το πανί ρότορα έχει επιδείξει μείωση έως και 4% στην κατανάλωση καυσίμων.

Oceanbird (Wallenius Marine)

Ημερομηνία εφαρμογής: Το 2020 παρουσιάστηκε η ιδέα, με σχέδια για δρομολόγηση το 2024.

Λειτουργία: Προορίζεται για τη μεταφορά αυτοκινήτων στον Ατλαντικό.

Κατασκευή: Νέα κατασκευή πλοίου.

Σύστημα: Χρησιμοποιεί μεγάλα φτερωτά πανιά, που φτάνουν πάνω από 80 μέτρα πάνω από την ίσαλο γραμμή.

Ενεργειακές πληροφορίες: Στόχος είναι να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών έως και 90% σε σύγκριση με τα συμβατικά φορτηγά πλοία.

Η ενσωμάτωση συστημάτων πρόωσης με τη βοήθεια του ανέμου μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική απόδοση των πλοίων. Αν και μπορεί να μην αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας, ο άνεμος είναι μια ελεύθερα διαθέσιμη, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που, όταν αξιοποιηθεί κατάλληλα, μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μετάβαση της βιομηχανίας προς τη βιώσιμη ναυτιλία. Καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις συνεχίζουν να βελτιώνουν τα συστήματα αυτά, η χρήση της αιολικής ενέργειας στα πλοία αναμένεται να αποκτήσει ακόμη μεγαλύτερη δυναμική στο μέλλον.

2.3 Βιοενέργεια

Η βιοενέργεια (bioenergy) και συγκεκριμένα τα βιοκαύσιμα αποτελούν έναν ελκυστικό τρόπο για τη ναυτιλιακή βιομηχανία να μειώσει το ανθρακικό της αποτύπωμα και να μεταβεί σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον [24].

2.3.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Η υιοθέτηση των βιοκαυσίμων στη ναυτιλία καθοδηγείται σε μεγάλο βαθμό από τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Σε διεθνές επίπεδο, η φιλοδοξία του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) να μειώσει στο μισό τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τη ναυτιλία έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008 υποστηρίζει σιωπηρά την υιοθέτηση βιοκαυσίμων. Ειδικοί εθνικοί κανονισμοί ή κίνητρα, όπως η οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (RED II - Renewable Energy Directive) στην ΕΕ, προωθούν ρητά τη χρήση βιοκαυσίμων στις μεταφορές, συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλίας [25].

Ημερομηνία έκδοσης: Η οδηγία RED II εγκρίθηκε τον Δεκέμβριο του 2018 και τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2021. Αποτελεί επικαιροποίηση της αρχικής οδηγίας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας του 2009 [26].

Αρμοδιότητα: Η οδηγία έχει εφαρμογή σε όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και εφαρμόζεται αποκλειστικά στα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, οι επιπτώσεις της μπορούν να γίνουν αισθητές και πέραν της ΕΕ λόγω της φύσης των εμπορικών και ενεργειακών σχέσεων.

Κύρια σημεία:

- Θέτει δεσμευτικό στόχο για τουλάχιστον 32% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ από ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2030. Ο στόχος αυτός μπορεί να επανεξεταστεί και ενδεχομένως να αυξηθεί έως το 2023.
- Επιτρέπει στα κράτη μέλη να θέσουν τους δικούς τους στόχους, αλλά πρέπει να επιτύχουν συλλογικά τον συνολικό στόχο της ΕΕ.
- Στοχεύει στη βελτίωση της βιωσιμότητας και στη μείωση των έμμεσων επιπτώσεων των βιοκαυσίμων στην αλλαγή χρήσης γης (ILUC). Ορισμένα βιοκαύσιμα με βάση τις καλλιέργειες, τα οποία ενδέχεται να προκαλούν περισσότερες εκπομπές από ό,τι εξοικονομούν, περιορίζονται και θα καταργηθούν σταδιακά.
- Προωθεί τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και εισάγει ειδικές διατάξεις για τους αυτοκαταναλωτές και τις κοινότητες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Υπογραμμίζει τη σημασία της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα της θέρμανσης και της ψύξης, θέτοντας ετήσιο στόχο αύξησης των ανανεώσιμων πηγών στον τομέα αυτό.

Εφαρμογή στη ναυτιλία: Η RED II δεν επικεντρώνεται πρωτίστως στη ναυτιλία αλλά αφορά κυρίως τους τομείς της χερσαίας κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, έμμεσα, μπορεί να επηρεάσει τη ναυτιλία, ιδίως όταν εξετάζονται τα βιοκαύσιμα ως εναλλακτικά καύσιμα για τα πλοία, καθώς στην οδηγία ορίζονται κριτήρια βιωσιμότητας των βιοκαυσίμων. Η πίεση της οδηγίας για πιο βιώσιμα βιοκαύσιμα μπορεί να επηρεάσει το είδος των βιοκαυσίμων που διατίθενται για ναυτιλιακή χρήση εντός της ΕΕ.

Παγκόσμια σημασία: Ενώ η οδηγία είναι νομικά δεσμευτική μόνο για τα κράτη μέλη της ΕΕ, η επιρροή της είναι συχνά ευρύτερη. Πολλές χώρες εκτός της ΕΕ βλέπουν τους κανονισμούς της ΕΕ ως πρότυπο, και οι πολυεθνικές εταιρείες συχνά ευθυγραμμίζουν τα πρότυπα τους με τους κανόνες της ΕΕ για τον εξορθολογισμό των δραστηριοτήτων τους.

Συνοπτικά, ενώ η οδηγία RED II δεν επικεντρώνεται στη ναυτιλία καθαυτή, οι διατάξεις του, ιδίως εκείνες που σχετίζονται με τα βιοκαύσιμα, μπορεί να έχουν έμμεσες επιπτώσεις στον τομέα της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

2.3.2 Αρχή λειτουργίας

Τα βιοκαύσιμα παράγονται από οργανικό υλικό, γνωστό ως βιομάζα, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει γεωργικές καλλιέργειες, δασικά υπολείμματα, ρεύματα αποβλήτων, ακόμη και φύκια. Η συγκεκριμένη

διαδικασία παραγωγής εξαρτάται από τον τύπο του βιοκαυσίμου. Για παράδειγμα, το βιοντίζελ μπορεί να παραχθεί μέσω μετεστεροποίησης, όπου έλαια ή λίπη αντιδρούν με αλκοόλη για την παραγωγή εστέρων (βιοντίζελ) και γλυκερόλης. Τα προηγμένα ή δεύτερης γενιάς βιοκαύσιμα, όπως η βιοαιθανόλη ή η βιομεθανόλη, παράγονται από λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα μέσω μιας πιο σύνθετης διαδικασίας προεπεξεργασίας, ζύμωσης και απόσταξης.

2.3.3 Εκπομπές ρύπων

Η καύση των βιοκαυσίμων παράγει CO₂, αλλά δεδομένου ότι η βιομάζα από την οποία προέρχονται τα καύσιμα απορροφά CO₂ κατά την ανάπτυξή της, η συνολική διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ουδέτερη ως προς τον άνθρακα, ή σχεδόν ουδέτερη, με την προϋπόθεση ότι η βιομάζα προέρχεται από βιώσιμες πηγές. Οι εκπομπές SO_x και σωματιδίων είναι συνήθως χαμηλότερες για τα βιοκαύσιμα από ό,τι για τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα, αλλά οι εκπομπές NO_x μπορεί να είναι παρόμοιες ή ελαφρώς υψηλότερες. Οι εκπομπές του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών από την παραγωγή και τη μεταφορά, μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το συγκεκριμένο βιοκαύσιμο και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

2.3.4 Ενεργειακή απόδοση

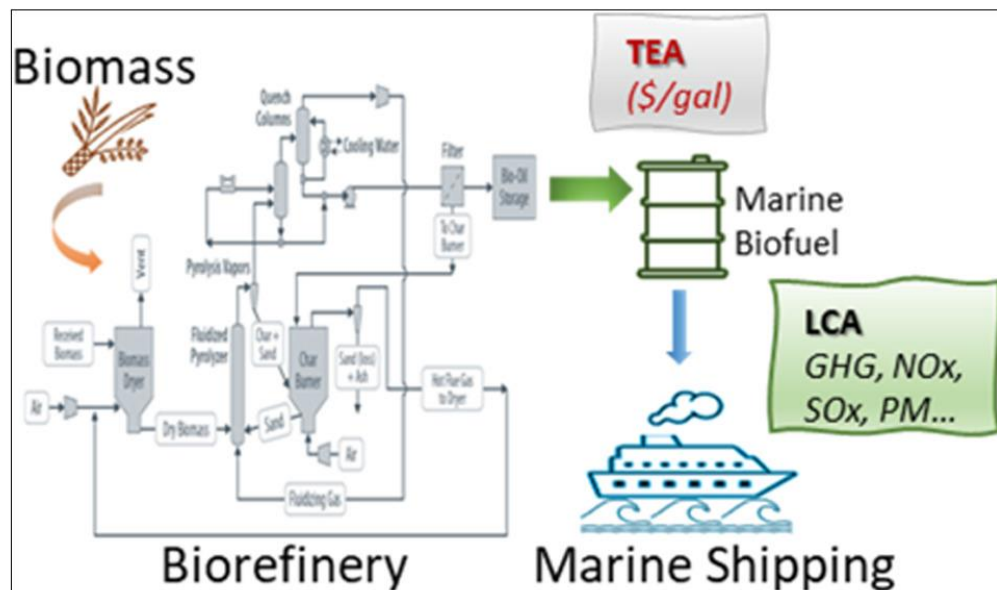
Όσον αφορά το ενεργειακό περιεχόμενο, τα βιοκαύσιμα είναι συνήθως λιγότερο αποδοτικά από τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να καεί περισσότερο καύσιμο για να παρασχεθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας. Ωστόσο, το ακριβές ενεργειακό περιεχόμενο μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ των διαφόρων τύπων βιοκαυσίμων. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι τα βιοκαύσιμα μπορούν συχνά να χρησιμοποιηθούν σε υπάρχοντες κινητήρες με ελάχιστες τροποποιήσεις, παρέχοντας μια σχετικά απλή πορεία προς χαμηλότερες εκπομπές.

2.3.5 Εφαρμογή σε πλοία

Τα βιοκαύσιμα χρησιμοποιούνται σε υφιστάμενες μηχανές εσωτερικής καύσης, είτε αμιγώς είτε ως μείγμα με συμβατικά καύσιμα, καθιστώντας τα δυνητικά ελκυστική επιλογή τόσο για νέες κατασκευές όσο και για μετασκευές. Οι λεπτομέρειες εξαρτώνται από τον τύπο του βιοκαυσίμου και τον συγκεκριμένο κινητήρα. Εταιρείες όπως η GoodFuels έχουν πρωτοπορήσει στη χρήση προηγμένων βιοκαυσίμων στη ναυτιλία, διεξάγοντας επιτυχείς δοκιμές με εταίρους όπως η IKEA Transport & Logistics Services και η CMA CGM.

Συνοπτικά, τα βιοκαύσιμα προσφέρουν μια βιώσιμη οδό για τη μείωση της έντασης άνθρακα των θαλάσσιων μεταφορών. Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν προκλήσεις όπως η διαθεσιμότητα των

πρώτων υλών, οι ανησυχίες για τη βιωσιμότητα και το υψηλότερο κόστος σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα, προκειμένου τα βιοκαύσιμα να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητές τους στη ναυτιλία (εικόνα 12). Η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη, μαζί με υποστηρικτικές πολιτικές και κανονισμούς, είναι ζωτικής σημασίας για την υπέρβαση αυτών των εμποδίων και την απελευθέρωση του πολλά υποσχόμενου δυναμικού της βιοενέργειας στη μετάβαση προς τη βιώσιμη ναυτιλία [27].



Εικόνα 11: Επιλογές βιοκαυσίμων για θαλάσσιες εφαρμογές [28]

2.4 Υδροδυναμική / κυματική ενέργεια

Η υδροδυναμική ενέργεια, ιδίως η κυματική ενέργεια (wave energy), είναι μια ανεξερεινήτη αλλά πολλά υποσχόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για θαλάσσιες εφαρμογές. Οι δυνατότητές της αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο, ανοίγοντας νέους δρόμους για τη μετάβαση της ναυτιλιακής βιομηχανίας προς την αειφορία [29].

2.4.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Δεν υπάρχουν ειδικοί διεθνείς κανονισμοί για τη χρήση υδροδυναμικής ή κυματικής ενέργειας στη ναυτιλία. Ωστόσο, οι ευρύτερες εντολές που έχει θεσπίσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ενθαρρύνουν σιωπηρά τη βιομηχανία να διερευνήσει και να υιοθετήσει όλες τις μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της υδροδυναμικής ενέργειας.

2.4.2 Αρχή λειτουργίας

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας (WEC-Wave Energy Converters) συλλέγουν την ενέργεια που παράγεται από την ανοδική και καθοδική κίνηση των κυμάτων και τη μετατρέπουν σε χρήσιμη ενέργεια για το πλοίο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι WECs, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, των απορροφητών σημειακής πηγής (point absorbers) και των ταλαντευόμενων στηλών νερού (OWC - oscillating water columns) και των συσκευών υπερπήδησης. Οι τεχνολογίες αυτές αξιοποιούν την κινητική και δυναμική ενέργεια των ωκεάνιων κυμάτων για την παραγωγή ενέργειας. Η μηχανική ενέργεια που συλλαμβάνεται στη συνέχεια μετατρέπεται συνήθως σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία διαφόρων συστημάτων επί του σκάφους. Ακολουθεί μια επισκόπηση των τριών τεχνολογιών που αναφέρθηκαν:

Απορροφητές σημειακής πηγής:

Περιγραφή: Πρόκειται για πλωτές κατασκευές, συχνά με σχήμα σημαδούρας, που αγκυροβολούνται στον πυθμένα της θάλασσας. Καθώς περνούν τα κύματα, η σημαδούρα κινείται πάνω και κάτω σε σχέση με το σημείο αγκυροβόλησής της, και αυτή η σχετική κίνηση κινεί υδραυλικές αντλίες ή άλλους μετατροπείς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εικονογράφιση: Φανταστείτε μια σημαδούρα που επιπλέει στο νερό. Καθώς τα κύματα ανεβοκατεβαίνουν, η σημαδούρα ανεβοκατεβαίνει. Αυτή η κατακόρυφη κίνηση, με τη σειρά της, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μηχανικών συστημάτων που βρίσκονται μέσα στη σημαδούρα ή στον πυθμένα της θάλασσας [30].

Ταλαντευόμενες στήλες νερού:

Περιγραφή: Μια τέτοια συσκευή αποτελείται από μια μερικώς βυθισμένη, κοίλη δομή ανοικτή στη θάλασσα κάτω από την ίσαλο γραμμή. Καθώς τα κύματα εισέρχονται στον πυθμένα της δομής, προκαλούν άνοδο και πτώση της στήλης νερού στο εσωτερικό της. Αυτή η ταλαντευόμενη στήλη νερού αναγκάζει τον αέρα πάνω από αυτήν να ρέει πέρα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.

Εικονογράφιση: Σκεφτείτε έναν μεγάλο κατακόρυφο σωλήνα μερικώς βυθισμένο στον ωκεανό. Τα κύματα ωθούν το νερό στον πυθμένα αυτού του σωλήνα, προκαλώντας την εκτόνωση του αέρα που είναι παγιδευμένος από πάνω, και καθώς το κύμα υποχωρεί, ο αέρας αναρροφάται ξανά. Αυτή η συνεχής ροή αέρα κινεί μια τουρμπίνα στην κορυφή της στήλης, μετατρέποντας την κίνηση του αέρα σε ηλεκτρική ενέργεια [31].

Ταλαντευόμενες συσκευές κύματος:

Περιγραφή: Αυτές οι συσκευές παράγουν ενέργεια από την οριζόντια κίνηση του νερού ή το "κύμα" κοντά στην ακτογραμμή. Συνήθως διαθέτουν ένα πτερύγιο ή πτερύγιο αρθρωμένο στον πυθμένα της θάλασσας και καθώς τα κύματα κυματίζουν μπρος-πίσω, το πτερύγιο κινείται, κινούμενο με υδραυλικές αντλίες ή γεννήτριες.

Εικονογράφηση: Φανταστείτε μια πόρτα συνδεδεμένη με το πλάι της σε έναν τοίχο. Αν σπρώξετε και τραβήξετε επανειλημμένα την πόρτα, αυτή θα ταλαντεύεται μπρος-πίσω στους μεντεσέδες της. Τώρα, τοποθετήστε αυτή την "πόρτα" σε ρηχά νερά και αφήστε τις κινήσεις των κυμάτων να την σπρώχνουν και να την τραβούν. Αυτή η κίνηση μπρος-πίσω αξιοποιείται στη συνέχεια για την παραγωγή ενέργειας [32].

2.4.3 Εκπομπές ρύπων

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της κυματικής ενέργειας είναι ότι δεν παράγει άμεσες εκπομπές ή ρύπους κατά τη λειτουργία της. Πρόκειται για μια καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι υπάρχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατασκευή, την εγκατάσταση και τη συντήρηση των συσκευών κυματικής ενέργειας, αν και αυτές είναι συνήθως πολύ χαμηλότερες από αυτές που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα.

2.4.4 Ενεργειακή απόδοση

Η αποδοτικότητα των μετατροπέων κυματικής ενέργειας εξαρτάται από τον σχεδιασμό της συσκευής και τις κυματικές συνθήκες. Δεν είναι άμεσα συγκρίσιμη με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, καθώς οι συσκευές κυματικής ενέργειας χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συμπλήρωση των συμβατικών πηγών ενέργειας και όχι για την πλήρη αντικατάστασή τους. Ενώ η ενεργειακή πυκνότητα της κυματικής ενέργειας είναι γενικά χαμηλότερη από τα ορυκτά καύσιμα, πρόκειται για μια ανεκμετάλλευτη, συνεχή και ελεύθερα διαθέσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να συμβάλει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων και μείωση των εκπομπών με την πάροδο του χρόνου.

2.4.5 Εφαρμογή σε πλοία

Επί του παρόντος, η εφαρμογή της κυματικής ενέργειας στον τομέα της ναυτιλίας βρίσκεται στα σπάργανα και διερευνάται κυρίως για την παραγωγή βοηθητικής ενέργειας. Οι συσκευές κυματικής ενέργειας θα πρέπει να ενσωματωθούν στον σχεδιασμό του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το μέγεθος του πλοίου, το λειτουργικό προφίλ και οι θαλάσσιες διαδρομές. Η κυματική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με άλλες ανανεώσιμες πηγές και συστήματα αποθήκευσης

ενέργειας για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας. Για παράδειγμα, η εταιρεία Eco Marine Power βρίσκεται στη διαδικασία ανάπτυξης του συστήματος Aquarius Marine Renewable Energy (MRE), το οποίο στοχεύει στην ενσωμάτωση άκαμπτων πανιών, ηλιακών συλλεκτών και μονάδων αποθήκευσης ενέργειας για την αξιοποίηση της αιολικής, ηλιακής και κυματικής ενέργειας.

Ενώ η κυματική ενέργεια είναι ένας αναδυόμενος τομέας στις θαλάσσιες εφαρμογές, με συνεχή έρευνα και ανάπτυξη, μπορεί σύντομα να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στο ισοζύγιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που θα τροφοδοτήσει το μέλλον της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Ωστόσο, είναι σημαντικό η επιστήμη να προχωρήσει παράλληλα με την πλήρη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των πρακτικών προκλήσεων που συνδέονται με την εφαρμογή συστημάτων κυματικής ενέργειας [33].

2.5 Πυρηνική ενέργεια

Η πυρηνική ενέργεια (nuclear energy) είναι μια αμφιλεγόμενη αλλά ισχυρή πηγή ενέργειας που έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Η εφαρμογή της στην εμπορική ναυτιλία είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω ανησυχιών για την ασφάλεια, τις κανονιστικές διατάξεις και την αποδοχή από το κοινό, αλλά οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν επαναφέρει τη συζήτηση στο προσκήνιο [34].

2.5.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας σε θαλάσσιες εφαρμογές διέπεται από ένα πολύπλοκο σύστημα διεθνών, περιφερειακών και εθνικών νόμων. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) και ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency) είναι οι πρωταρχικοί διεθνείς οργανισμοί που καθορίζουν τα πρότυπα και τους κανονισμούς για τα πλοία με πυρηνική ενέργεια.

Ο ΙΑΕΑ έχει θεσπίσει ένα ολοκληρωμένο σύνολο προτύπων ασφαλείας για την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από τις βλαβερές συνέπειες της ιονίζουσας ακτινοβολίας. Τα πρότυπα αυτά παρέχουν ένα σύστημα θεμελιωδών αρχών ασφαλείας και αντικατοπτρίζουν μια διεθνή συναίνεση σχετικά με το τί συνιστά υψηλό επίπεδο ασφαλείας για την προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος. Περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, αρχές για την ακτινοπροστασία, την αξιολόγηση της ασφαλείας, τα συστήματα διαχείρισης και την κυβερνητική οργάνωση.

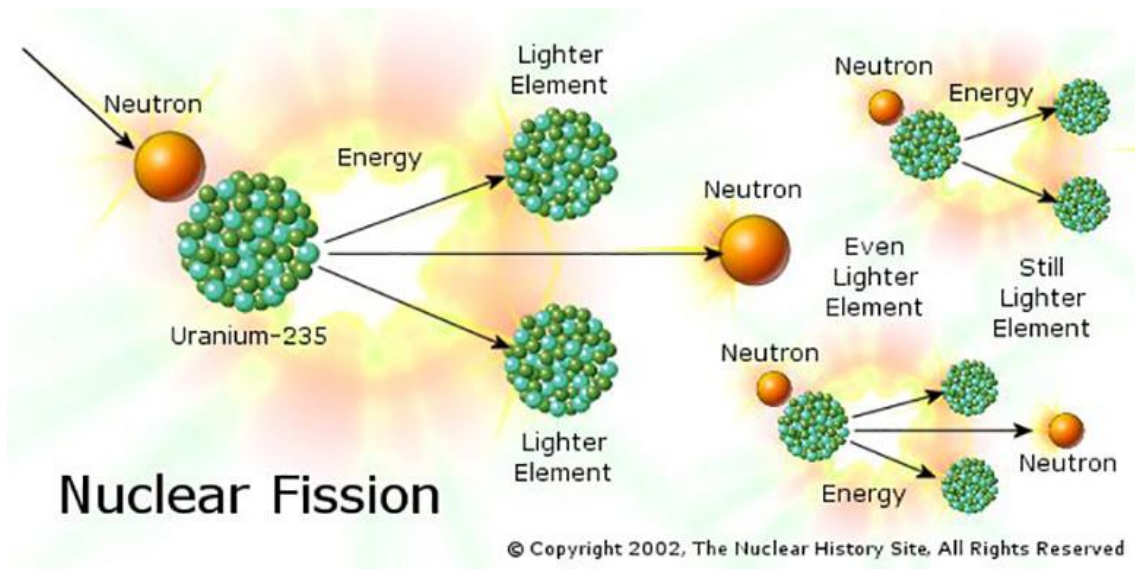
Ο IMO, στη Διεθνή Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS), θεσπίζει διατάξεις για τα πυρηνικά πλοία στο κεφάλαιο VIII. Το κεφάλαιο VIII περιλαμβάνει κανονισμούς που πρέπει να πληρούνται σχετικά με το σχεδιασμό, την κατασκευή και τον εξοπλισμό των πυρηνικών πλοίων με σκοπό την απόκτηση πιστοποιητικών ασφαλείας.

Επιπλέον, υπάρχουν ειδικές διεθνείς συμβάσεις που διέπουν τη μεταφορά πυρηνικών υλικών. Αυτές περιλαμβάνουν τη Σύμβαση για τη φυσική προστασία του πυρηνικού υλικού, καθώς και τις κατευθυντήριες γραμμές για την ασφαλή μεταφορά ραδιενεργών υλικών που παρέχει ο ΙΑΕΑ.

2.5.2 Αρχή λειτουργίας

Η καρδιά ενός πυρηνοκίνητου πλοίου είναι ο πυρηνικός αντιδραστήρας, ο οποίος χρησιμοποιεί την πυρηνική σχάση για την παραγωγή ενέργειας όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Κατά τη διαδικασία αυτή, ο πυρήνας ενός βαρέως ατόμου, συνήθως ουρανίου-235 ή πλουτωνίου-239, βομβαρδίζεται με ένα νετρόνιο, με αποτέλεσμα να διασπάται σε δύο μικρότερα άτομα και να απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Η θερμότητα αυτή μεταφέρεται σε ένα ψυκτικό μέσο (συνήθως νερό ή αέριο υπό πίεση), το οποίο στη συνέχεια κυκλοφορεί σε μια ατμογεννήτρια.

Στη γεννήτρια ατμού, η θερμότητα από το ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του νερού σε ατμό. Αυτός ο ατμός υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την κίνηση των στροβίλων, οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν με τις προπέλες του πλοίου για την πρόωση ή/και με γεννήτριες για ηλεκτρική ενέργεια (εικόνα 14).



Εικόνα 12: Η διαδικασία της σχάσης [35]

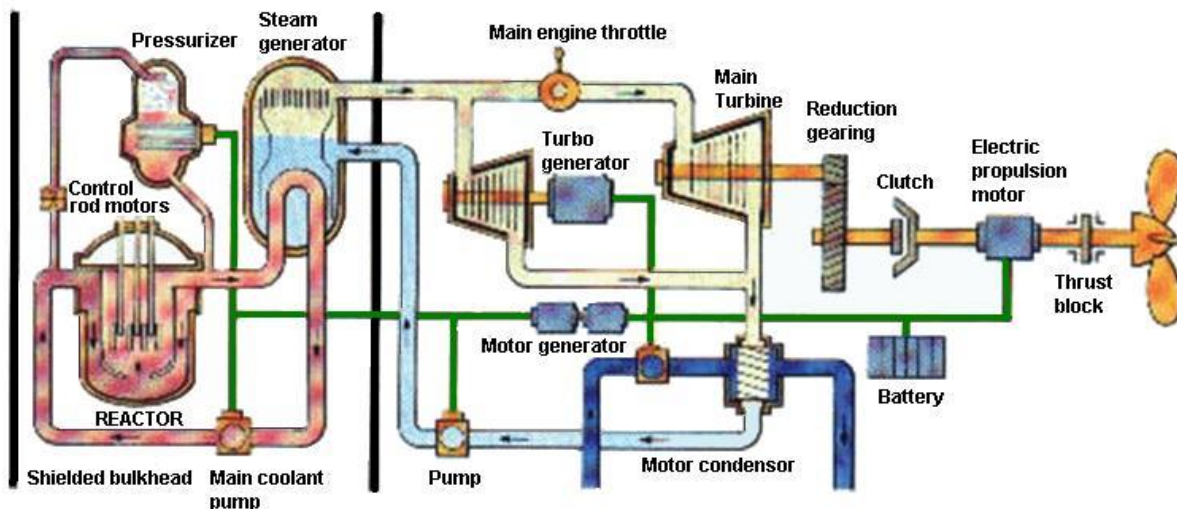
Ένα βασικό χαρακτηριστικό των πυρηνικών αντιδραστήρων είναι η αλυσιδωτή αντίδραση. Όταν ένας πυρήνας ουρανίου-235 ή πλουτωνίου-239 διασπάται, απελευθερώνει επιπλέον νετρόνια, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να προκαλέσουν περισσότερες διασπάσεις, απελευθερώνοντας περισσότερη

θερμότητα και περισσότερα νετρόνια. Αυτή η αλυσιδωτή αντίδραση είναι αυτοσυντηρούμενη μέχρι να εξαντληθεί το καύσιμο.

Για τον έλεγχο της αλυσιδωτής αντίδρασης χρησιμοποιούνται ράβδοι ελέγχου από υλικά που απορροφούν νετρόνια. Ρυθμίζοντας τη θέση αυτών των ράβδων ελέγχου, οι χειριστές μπορούν να ελέγχουν τον ρυθμό της αντίδρασης σχάσης και, συνεπώς, την ισχύ εξόδου του αντιδραστήρα.

Τα συστήματα ασφαλείας αποτελούν κρίσιμο μέρος του σχεδιασμού των πυρηνικών αντιδραστήρων. Αυτά περιλαμβάνουν συστήματα ψύξης έκτακτης ανάγκης για την απομάκρυνση της θερμότητας από τον αντιδραστήρα σε περίπτωση αποτυχίας του κανονικού συστήματος ψύξης, δομές περιορισμού για την αποτροπή της απελευθέρωσης ραδιενεργών υλικών και συστήματα αυτόματης διακοπής της αλυσιδωτής αντίδρασης σε περίπτωση που εμφανιστούν δυσμενείς συνθήκες.

Pressurized-water Naval Nuclear Propulsion System



Εικόνα 13: Πυρηνική πρόωση [36]

2.5.3 Εκπομπές ρύπων

Όσον αφορά τις λειτουργικές εκπομπές, η πυρηνική ενέργεια είναι μια πηγή ενέργειας με μηδενικές εκπομπές, καθώς δεν παράγει CO₂ ή άλλα αέρια του θερμοκηπίου. Ωστόσο, παράγει πυρηνικά απόβλητα, η διάθεση των οποίων δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές ανησυχίες και προβλήματα ασφαλείας. Επιπλέον, οι εκπομπές του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών από την εξόρυξη, τον εξευγενισμό και τη μεταφορά πυρηνικών καυσίμων και την κατασκευή και τον παροπλισμό

των αντιδραστήρων, θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

2.5.4 Ενεργειακή απόδοση

Η πυρηνική ενέργεια είναι απίστευτα ενεργειακά πυκνή. Μια μικρή ποσότητα πυρηνικού καυσίμου μπορεί να παράγει τεράστια ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Για παράδειγμα, τα πυρηνικά παγοθραυστικά και αεροπλανοφόρα μπορούν να λειτουργούν για χρόνια χωρίς ανεφοδιασμό. Αυτή η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και τα μεγάλα διαστήματα ανεφοδιασμού καθιστούν την πυρηνική ενέργεια ελκυστική πρόταση για θαλάσσιες επιχειρήσεις μεγάλων αποστάσεων και υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων.

2.5.5 Εφαρμογή σε πλοία

Ενώ η πυρηνική πρόωση έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολεμικά πλοία, όπως αεροπλανοφόρα και υποβρύχια, η εφαρμογή της στην εμπορική ναυτιλία παραμένει περιορισμένη. Οι κύριες ανησυχίες είναι η ασφάλεια και ο πιθανός κίνδυνος διάδοσης των πυρηνικών όπλων. Παρ' όλα αυτά, ορισμένα πρόσφατα σχέδια για εμπορικά πλοία με πυρηνική ενέργεια, όπως αυτά που προτείνονται από εταιρείες όπως η Core Power, στοχεύουν στην αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών με τη χρήση μικρών αρθρωτών αντιδραστήρων (SMR) και αντιδραστήρων τηγμένου άλατος (MSR), οι οποίοι φημολογείται ότι είναι ασφαλέστεροι και αποδοτικότεροι από τους παραδοσιακούς πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται για την κίνηση των ναυτικών σκαφών εδώ και αρκετές δεκαετίες, ιδίως των υποβρυχίων και των αεροπλανοφόρων. Ακολουθούν δύο εξέχοντα παραδείγματα επιχειρησιακών πλοίων που κινούνται με πυρηνικούς αντιδραστήρες:

USS Gerald R. Ford (CVN-78) - Αεροπλανοφόρο

Έναρξη λειτουργίας συστήματος: 9 Νοεμβρίου 2013

Ανατέθηκε σε υπηρεσία: 22 Ιουλίου 2017

Σύστημα πρόωσης: Κατηγορίας Ford, εξοπλισμένο με δύο πυρηνικούς αντιδραστήρες A1B. Αυτοί οι αντιδραστήρες είναι νεότερης σχεδίασης, προσφέροντας σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, την ισχύ και τη διάρκεια ζωής του πυρήνα σε σύγκριση με τους παλαιότερους αντιδραστήρες.

Λειτουργικές λεπτομέρειες: Οι αντιδραστήρες που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των αντιδραστήρων είναι πολύ ισχυροί: Το πλοίο έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει περισσότερα από 75

αεροσκάφη και έχει εκτόπισμα πλήρους φορτίου περίπου 100.000 τόνων. Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες του επιτρέπουν τη συνεχή λειτουργία του για πάνω από 20 χρόνια χωρίς ανεφοδιασμό, παρέχοντας στο Ναυτικό των ΗΠΑ ένα σημαντικό στρατηγικό πλεονέκτημα.

Πρόσθετες πληροφορίες: Το πλοίο αυτό αποτελεί το πρώτο μιας νέας κατηγορίας αεροπλανοφόρων (κατηγορία Ford) που σχεδιάστηκε για να αντικαταστήσει τα αεροπλανοφόρα της κατηγορίας Nimitz.

USS Virginia (SSN-774) - Υποβρύχιο Ταχείας Επίθεσης

Έναρξη λειτουργίας συστήματος: 16 Αυγούστου 2003

Ανατέθηκε σε υπηρεσία: Οκτώβριος 2004

Σύστημα πρόωσης: Κατηγορίας Virginia, εξοπλισμένο με έναν πυρηνικό αντιδραστήρα S9G. Ο αντιδραστήρας δεν κινεί μόνο την πρόωση του υποβρυχίου αλλά υποστηρίζει επίσης όλα τα συστήματα επί του σκάφους.

Επιχειρησιακές λεπτομέρειες: Το υποβρύχιο διαθέτει επίσης ένα πλήρες σύστημα ελέγχου. Με υποβρύχιο εκτόπισμα περίπου 7.800 τόνων και ταχύτητα άνω των 25 κόμβων, αυτό το υποβρύχιο έχει σχεδιαστεί για μια ποικιλία προφίλ αποστολών, συμπεριλαμβανομένου του ανθυποβρυχιακού πολέμου, του πολέμου κατά πλοίων επιφανείας και της υποστήριξης ειδικών επιχειρήσεων.

Πρόσθετες πληροφορίες: Το USS Virginia είναι το ηγετικό πλοίο των υποβρυχίων της κατηγορίας Virginia, μιας κατηγορίας που αντιπροσωπεύει μια πιο οικονομικά αποδοτική λύση για τον υποβρύχιο πόλεμο σε σενάρια μετά τον Ψυχρό Πόλεμο, δίνοντας έμφαση στην ευελιξία και τις παράκτιες επιχειρήσεις.

Και τα δύο αυτά πλοία, όπως και άλλα πυρηνοκίνητα πλοία του Πολεμικού Ναυτικού, μπορούν να επιχειρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να χρειάζονται ανεφοδιασμό, προσφέροντας πλεονεκτήματα στρατηγικής κινητικότητας και αντοχής. Οι αντιδραστήρες τους παράγουν επίσης ηλεκτρική ενέργεια για την τροφοδοσία όλων των συστημάτων επί του σκάφους και την παραγωγή γλυκού νερού για τα μέλη του πληρώματος. Οι κύριες ανησυχίες για την ασφάλεια αυτών των πλοίων προέρχονται από την πιθανή απελευθέρωση ραδιενεργών υλικών, αλλά οι ναυτικοί αντιδραστήρες έχουν σχεδιαστεί με πολλαπλά επίπεδα ασφαλείας για να αποτρέψουν οποιαδήποτε τέτοια απελευθέρωση.

Συμπερασματικά, ενώ η πυρηνική ενέργεια προσφέρει μια λύση πρόωσης υψηλής ενέργειας και μηδενικών εκπομπών, η υιοθέτησή της στη ναυτιλιακή βιομηχανία χρειάζεται προσεκτική εξέταση και αυστηρή ρυθμιστική εποπτεία. Οι προκλήσεις της διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων, της

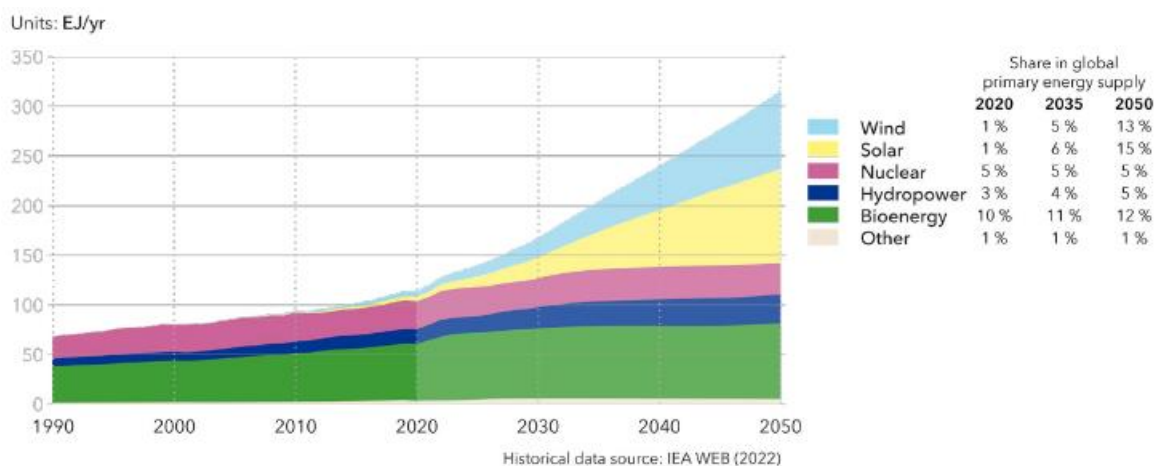
ασφάλειας και της αποδοχής από το κοινό πρέπει να αντιμετωπιστούν διεξοδικά. Είναι επίσης ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι η υιοθέτηση της πυρηνικής ενέργειας στη ναυτιλία δεν θα συμβάλει στους κινδύνους διάδοσης των πυρηνικών όπλων. Με την πρόοδο των πυρηνικών τεχνολογιών και ένα σαφές ρυθμιστικό πλαίσιο, η πυρηνική ενέργεια μπορεί να διαδραματίσει ρόλο στη μελλοντική απεξάρτηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας από τον άνθρακα [37]. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται μια σύνοψη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που δύνανται να χρησιμοποιηθούν στη ναυτιλία.

Πίνακας 1: Σύνοψη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΛΟΙΑ	
ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	Οι κανονισμοί του IMO υποστηρίζουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.	Οι ηλιακοί συλλέκτες μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια.	Μηδενικές λειτουργικές εκπομπές.	Χαμηλότερη από τα ορυκτά καύσιμα αλλά βελτιώνεται με την τεχνολογία.	Ηλιακοί συλλέκτες εγκατεστημένοι στο κατάστρωμα ή ενσωματωμένοι στη δομή του πλοίου.	[12]
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	Οι κανονισμοί του IMO υποστηρίζουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.	Η ενέργεια συλλαμβάνεται από τον άνεμο με τη χρήση ανεμογεννητριών ή πανιών.	Μηδενικές λειτουργικές εκπομπές.	Μεταβλητή και εξαρτάται από τις συνθήκες ανέμου.	Οι τουρμπίνες ή τα πανιά ρότορα μπορούν να εγκατασταθούν σε νέα ή υπάρχοντα σκάφη.	[15]
ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑ	Η στρατηγική του IMO για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου υποστηρίζει τα βιοκαύσιμα . Ειδικοί κανονισμοί, όπως ο RED II της ΕΕ, προωθούν τα βιοκαύσιμα .	Τα βιοκαύσιμα παράγονται από οργανικά υλικά και καίγονται σε μηχανές εσωτερικής καύσης.	Χαμηλότερες εκπομπές από τα ορυκτά καύσιμα. Ορισμένα βιοκαύσιμα μπορούν να είναι σχεδόν ουδέτερα ως προς τον άνθρακα.	Χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τα ορυκτά καύσιμα, αλλά τα βιοκαύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπάρχοντες κινητήρες.	Χρησιμοποιείται σε συμβατικούς κινητήρες, είτε αμιγώς είτε ως μείγμα με συμβατικά καύσιμα.	[18]
ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ / ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	Δεν ρυθμίζεται ακόμη ειδικά, αλλά υποστηρίζεται σιωπηρά από τη στρατηγική του IMO για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου.	Η ενέργεια συλλέγεται από την κίνηση των κυμάτων με τη χρήση μετατροπέων κυματικής ενέργειας.	Μηδενικές λειτουργικές εκπομπές.	Χαμηλότερη από τα ορυκτά καύσιμα, αλλά μπορεί να συμπληρώσει τις συμβατικές πηγές ενέργειας.	Σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης. Οι συσκευές κυματικής ενέργειας θα ενσωματωθούν στο σχεδιασμό του πλοίου.	[26]
ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	Ρυθμίζεται από τον IMO και τον IAEA, με αυστηρά πρότυπα ασφάλειας και μη διάδοσης.	Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες χρησιμοποιούν την πυρηνική σχάση για την παραγωγή θερμότητας, η οποία μετατρέπεται σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.	Μηδενικές λειτουργικές εκπομπές αλλά παράγει πυρηνικά απόβλητα.	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Μπορεί να λειτουργήσει για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανεφοδιασμό.	Κυρίως σε στρατιωτικά πλοία, λόγω ανησυχιών για την ασφάλεια και την προστασία. Περιορισμένη χρήση στην εμπορική ναυτιλία.	[28]

2.6 Μελλοντικά σενάρια ΑΠΕ έως το 2050

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται ένα μελλοντικό σενάριο του DNV σχετικά με την κάλυψη της πρωτεύουσας ενέργειας παγκοσμίως από διάφορες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε όλους τους τομείς κατανάλωσης ενέργεια (μεταφοράς, βιομηχανίας, κατασκευών, κ.λπ.).



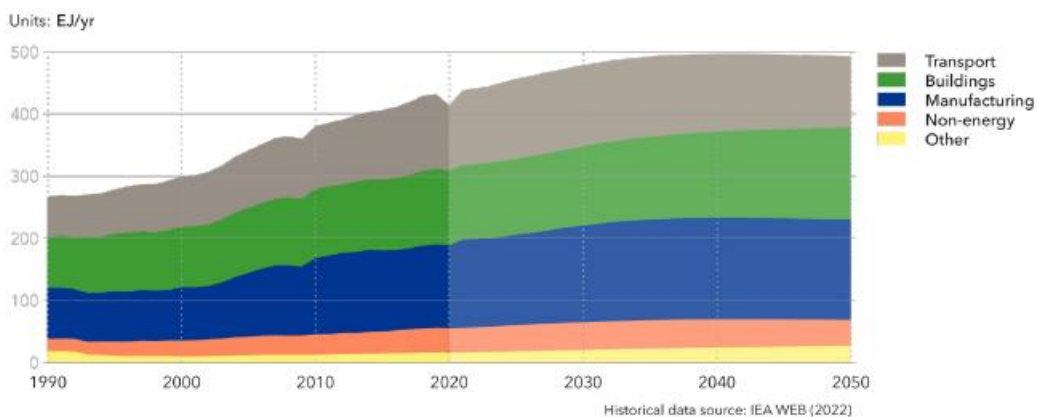
Εικόνα 14: Παγκόσμιος ενεργειακός εφοδιασμός με μη ορυκτά καύσιμα ανά πηγή [16]

Σύμφωνα με τα στοιχεία του DNV η ανάπτυξη και χρήση των ΑΠΕ για παραγωγή ενέργειας μέχρι το 2050 είναι εκθετική, με την ηλιακή χωρητικότητα να αυξάνεται 22 φορές και την αιολική χωρητικότητα να αυξάνεται κατά εννέα φορές. Επιπλέον, η χερσαία αιολική ενέργεια αναμένεται να παρουσιάσει αύξηση κατά επτά φορές, ενώ η υπεράκτια αιολική ενέργεια εντυπωσιακή αύξηση κατά 56 φορές. Αυτή η απότομη αύξηση προωθείται από την ταχεία μείωση του κόστους της σχετικής τεχνολογίας και την αυξανόμενη συνειδητοποίηση ότι οι ΑΠΕ αντιπροσωπεύουν μια ταχεία πορεία προς την απεξάρτηση από τον άνθρακα και τη διασφάλιση της ενεργειακής σταθερότητας. Η βιοενέργεια θεωρείται επίσης μία από τις βασικές επιλογές για την παροχή ενέργειας το 2050, ιδίως σε περιοχές που είναι δύσκολη η χρήση των υπολοίπων ΑΠΕ. Η πυρηνική ενέργεια και η υδροδυναμική ενέργεια (δεν περιλαμβάνεται σε αυτή η κυματική ενέργεια) αναμένεται να συμμετέχουν με ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 5%.

Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται η τελική ζήτηση παγκόσμιας ενέργειας μέχρι το 2050 σύμφωνα με την ίδια πηγή. Παρατηρείται ότι από το έτος 2035 και μετά, η ζήτηση δεν παρουσιάζει σχεδόν καμία διακύμανση, παραμένοντας ουσιαστικά σταθερή. Αν και φαίνεται ότι η ζήτηση ενέργειας θα παραμείνει σταθερή μετά το 2050, ενδέχεται να σημειωθούν αποκλίσεις. Καθώς η πλειονότητα των ενεργειακών υπηρεσιών μεταβαίνει σε ηλεκτρικούς τρόπους λειτουργίας, ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση σε όλους τους

τομείς, υπάρχει πιθανότητα αύξησης της ζήτησης ενέργειας. Ωστόσο, η πιθανή μείωση του παγκόσμιου πληθυσμού και οι πιθανές οικονομικές προκλήσεις λόγω των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής ενδέχεται να αντισταθμίσουν αυτή την αύξηση. Μετά το 2050, ακόμη και αν αυξηθεί η ζήτηση ενέργειας, είναι πιθανό να μην συσχετιστεί με αύξηση των εκπομπών αερίων.

Θα πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι η "τελική" ενέργεια αφορά την ενέργεια που παρέχεται στους τομείς των καταναλωτών (μεταφορές, βιομηχανία, κατασκευές, κ.λπ.). Δεν λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ή την ενέργεια που χρησιμοποιείται εντός του ίδιου του ενεργειακού τομέα, όπως στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τα πετρελαϊκά πεδία, τα διυλιστήρια και τις σχετικές υποδομές.



Εικόνα 15: Παγκόσμια τελική ζήτηση ενέργειας ανά τομέα [16]

3. Εναλλακτικά καύσιμα

Στο τρίτο κεφάλαιο, "Εναλλακτικά καύσιμα", εμβαθύνουμε σε μια κρίσιμη πτυχή της μετάβασης προς τη βιώσιμη ναυτιλία - τη διερεύνηση και την εφαρμογή εναλλακτικών πηγών καυσίμων. Καθώς ο ναυτιλιακός τομέας παλεύει με την ανάγκη να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να συμμορφωθεί με ολοένα και αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, η διερεύνηση εναλλακτικών, φιλικών προς το περιβάλλον καυσίμων έχει αποκτήσει τεράστια σημασία. Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζονται τέσσερις πολλά υποσχόμενοι υποψήφιοι που θα μπορούσαν να επαναπροσδιορίσουν το τοπίο των καυσίμων στη ναυτιλιακή βιομηχανία: μεθανόλη, αμμωνία, βιοκαύσιμα και υδρογόνο. Καθένα από αυτά τα καύσιμα παρουσιάζει το δικό του σύνολο πλεονεκτημάτων και προκλήσεων όσον αφορά την παραγωγή, την αποθήκευση, τη διανομή και τη χρήση επί του πλοίου. Μέσω μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης αυτών των εναλλακτικών καυσίμων, των δυνατοτήτων τους για εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα και της ευθυγράμμισής τους με τους περιβαλλοντικούς στόχους του τομέα, το παρόν κεφάλαιο έχει ως στόχο να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για το μέλλον της ναυτιλιακής ενέργειας.

3.1 Μεθανόλη

3.1.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Η μεθανόλη ως καύσιμο πλοίων εμπίπτει στον Διεθνή Κώδικα Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν Αέρια ή άλλα Καύσιμα Χαμηλού Σημείου Ανάφλεξης (IGF Code), που αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου για τα πλοία, το πλήρωμα και το περιβάλλον. Ο κώδικας αντιμετωπίζει ζητήματα ασφάλειας που συνδέονται με τη χρήση καυσίμων χαμηλού σημείου ανάφλεξης και λαμβάνει υπόψη όλους τους τομείς που χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού, της εγκατάστασης και της αποθήκευσης τέτοιων καυσίμων στο πλοίο [38].

3.1.2 Χαρακτηριστικά

Η μεθανόλη, ή CH_3OH , είναι η απλούστερη αλκοόλη και είναι ένα ελαφρύ, πτητικό, άχρωμο, εύφλεκτο υγρό με χαρακτηριστική οσμή. Είναι λιγότερο τοξική από πολλά άλλα ναυτιλιακά καύσιμα, αλλά και πάλι πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή λόγω των βλαβερών επιπτώσεών της στην ανθρώπινη υγεία σε περίπτωση κατάποσης, εισπνοής ή απορρόφησης μέσω του δέρματος.

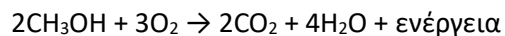
Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό της μεθανόλης είναι ότι αποτελεί υγρό σε θερμοκρασία δωματίου, γεγονός που την καθιστά σχετικά εύκολη στην αποθήκευση και μεταφορά υπό κανονικές συνθήκες, όπως και τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Έχει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να αποθηκευτεί περισσότερη μεθανόλη στο σκάφος για να επιτευχθεί η ίδια εμβέλεια.

Επιπλέον, η μεθανόλη έχει υψηλό αριθμό οκτανίων και χαμηλό σημείο ανάφλεξης (περίπου 12 βαθμούς Κελσίου), γεγονός που την καθιστά εξαιρετικά εύφλεκτη αλλά και κατάλληλη για κινητήρες υψηλής συμπίεσης. Η υψηλή λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισής της επιτρέπει υψηλότερη απόδοση σε κινητήρες με ανάφλεξη με σπινθήρα και μπορεί να συμβάλει στην πρόσθετη ψύξη σε κινητήρες άμεσου ψεκασμού.

Η μεθανόλη αποθηκεύεται συνήθως σε θερμοκρασίες και πιέσεις περιβάλλοντος. Το σημείο ανάφλεξης μιας ουσίας δεν πρέπει να συγχέεται με τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Ενώ η μεθανόλη μπορεί να έχει θερμοκρασία ανάφλεξης γύρω στους 12 βαθμούς Κελσίου, αυτή αναφέρεται στην ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να αναφλεγεί όταν εκτεθεί σε μια πηγή ανάφλεξης. Στην αποθηκευμένη της κατάσταση, χωρίς την παρουσία πηγής ανάφλεξης ή επαρκούς συγκέντρωσης οξυγόνου, η μεθανόλη δεν αναφλέγεται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπως οι 25 βαθμοί. Είναι σημαντικό να διασφαλίζεται ότι η μεθανόλη αποθηκεύεται σε καλά αεριζόμενο χώρο μακριά από πηγές ανάφλεξης.

3.1.3 Διαδικασία καύσης

Η μεθανόλη (CH₃OH) αντιδρά με το οξυγόνο (O₂) και παράγει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), νερό (H₂O) και ενέργεια. Η αντίδραση αυτή μπορεί να αναπαρασταθεί από την ακόλουθη ισορροπημένη χημική εξίσωση:



Σε έναν κινητήρα μεθανόλης, η αντίδραση αυτή λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό των κυλίνδρων. Το καύσιμο μεθανόλης αρχικά ψεκάζεται, αναμιγνύεται με αέρα και στη συνέχεια αναφλέγεται με σπινθήρα ή με τη θερμότητα και την πίεση της συμπίεσης, ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα.

Η καύση της μεθανόλης είναι πολύ καθαρή, καθώς δεν παράγει αιθάλη ή άλλα σωματίδια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεθανόλη, σε αντίθεση με τους βαρύτερους υδρογονάνθρακες, δεν έχει δεσμό άνθρακα-άνθρακα, ο οποίος αποτελεί πρωταρχική πηγή σωματιδιακής ύλης όταν διασπάται κατά τη διαδικασία της καύσης.

Επιπλέον, επειδή η μεθανόλη περιέχει μόνο ένα άτομο άνθρακα ανά μόριο (σε σύγκριση με τα πολλά σε μακρύτερες αλυσίδες υδρογονανθράκων που βρίσκονται σε άλλα καύσιμα), παράγονται λιγότερα μόρια CO₂ για κάθε μονάδα ενέργειας που απελευθερώνεται. Επομένως, ενώ εξακολουθεί να εκπέμπεται CO₂, οι εκπομπές CO₂ ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας μπορεί να είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με τα βαρύτερα καύσιμα υδρογονανθράκων.

Στην πράξη, η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας καύσης και, συνεπώς, οι ακριβείς εκπομπές και η παραγωγή ενέργειας εξαρτώνται, μεταξύ άλλων, από τον σχεδιασμό του κινητήρα, την ποιότητα του καυσίμου μεθανόλης και τις συνθήκες λειτουργίας [39].

3.1.4 Εκπομπές ρύπων

Η καύση της μεθανόλης παράγει λιγότερες εκπομπές σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Δεν παράγει οξειδία του θείου (SO_x) και παράγει λιγότερα οξειδία του αζώτου (NO_x) και σωματίδια. Ωστόσο, εξακολουθεί να εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) το οποίο θεωρείται αέριο του θερμοκηπίου. Οι καθαρές εκπομπές εξαρτώνται από τον τρόπο παραγωγής της μεθανόλης. Εάν στην παραγωγή χρησιμοποιούνταν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η μεθανόλη θα μπορούσε να θεωρηθεί καύσιμο με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η μεθανόλη έχει δυνατότητες ως εναλλακτικό καύσιμο για τα πλοία, οι ευρύτερες επιπτώσεις μιας μεγάλης κλίμακας μετάβασης στη μεθανόλη πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά. Αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο τις εκτιμήσεις για την ασφάλεια επί του πλοίου και την ανάγκη για ειδικά σχεδιασμένους ή μετασκευασμένους κινητήρες, αλλά και την υποδομή για την παραγωγή, αποθήκευση και διανομή μεθανόλης, καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής της χρήσης μεθανόλης.

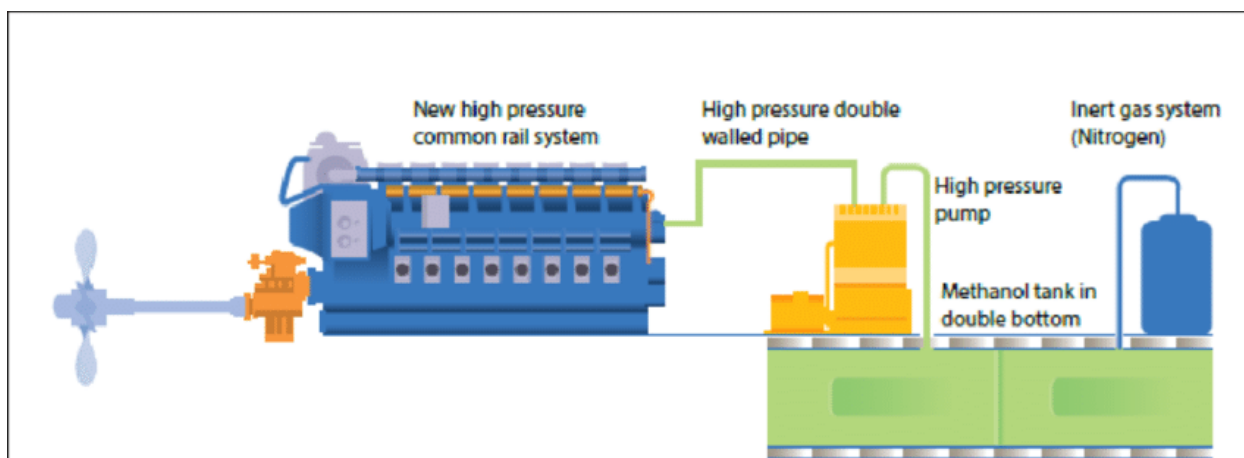
3.1.5 Εγκατάσταση συστήματος

Δεξαμενές αποθήκευσης: Η μεθανόλη αποθηκεύεται σε ειδικά σχεδιασμένες δεξαμενές, συχνά κατασκευασμένες από ανοξείδωτο χάλυβα ή άλλα υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση, λόγω των διαβρωτικών ιδιοτήτων της μεθανόλης όταν έρχεται σε επαφή με ορισμένα μέταλλα.

Τοποθέτηση δεξαμενών: Οι δεξαμενές τοποθετούνται συνήθως κάτω από το κατάστρωμα για να προστατεύονται από το άμεσο ηλιακό φως και τις εξωτερικές ζημιές. Ωστόσο, σε ορισμένα πλοία, ιδίως σε εκείνα που έχουν μετατραπεί από άλλους τύπους καυσίμων σε μεθανόλη, οι δεξαμενές μπορεί να τοποθετηθούν στο κατάστρωμα, δεδομένων των περιορισμών που υπάρχουν στην τροποποίηση της δομής του πλοίου (εικόνα 17).

Διαδικασία ανεφοδιασμού: Ο ανεφοδιασμός με μεθανόλη είναι παρόμοιος με τον παραδοσιακό ανεφοδιασμό. Χρησιμοποιούνται εξειδικευμένοι σταθμοί ανεφοδιασμού που είναι εξοπλισμένοι για να χειρίζονται μεθανόλη. Τηρούνται τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας, διασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχουν πηγές ανάφλεξης κοντά και ότι η περιοχή αερίζεται καλά για να αποφευχθεί η συσσώρευση ατμών μεθανόλης.

Διαθεσιμότητα κινητήρων μεθανόλης: Οι κινητήρες υγρής μεθανόλης είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο. Αρκετοί κατασκευαστές κινητήρων έχουν αναπτύξει ή βρίσκονται στη διαδικασία ανάπτυξης ναυτικών κινητήρων βελτιστοποιημένων για χρήση μεθανόλης. Αυτοί οι κινητήρες έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται τις μοναδικές ιδιότητες της μεθανόλης, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική καύση και ελαχιστοποίηση των εκπομπών.



Εικόνα 16: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης των μηχανημάτων για τη χρήση μεθανόλης [40]

Αναφέρονται 2 παραδείγματα πλοίων που λειτουργούν με καύσιμο μεθανόλη:

"Σκάφη με καύσιμο τη μεθανόλη" της Methanex Corporation: Η Methanex, ο μεγαλύτερος παραγωγός και προμηθευτής μεθανόλης στον κόσμο, συνεργάστηκε με την Waterfront Shipping για την ανάθεση μιας σειράς πλοίων που κινούνται με μεθανόλη. Τα πλοία αυτά διαθέτουν κινητήρες διπλού καυσίμου, που τους επιτρέπουν να λειτουργούν τόσο με μεθανόλη όσο και με παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα. Από τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία, έχουν τεθεί σε λειτουργία επτά τέτοια πλοία, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα και τις δυνατότητες της μεθανόλης ως ναυτιλιακό καύσιμο.

Stena Germanica: Το Stena Germanica, που δρομολογήθηκε από τη Stena Line, είναι ένα από τα πρώτα επιβατηγά οχηματαγωγά πλοία που μετατράπηκαν για να λειτουργούν με μεθανόλη. Λειτουργώντας

μεταξύ του Γκέτεμποργκ στη Σουηδία και του Κιέλου στη Γερμανία, το πλοίο υποβλήθηκε σε σημαντική διαδικασία μετατροπής στις αρχές του 2015. Η επιτυχία αυτού του έργου ανέδειξε τις δυνατότητες της μεθανόλης όχι μόνο για φορτηγά πλοία αλλά και για επιβατηγά πλοία.

Και τα δύο έργα καταδεικνύουν το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μεθανόλη ως καθαρότερη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα και ως ένα βήμα προς πιο βιώσιμες θαλάσσιες μεταφορές.

3.2 Αμμωνία

3.2.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Όπως και η μεθανόλη, η χρήση της αμμωνίας ως καύσιμο πλοίων διέπεται κυρίως από τον Διεθνή Κώδικα Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν Αέρια ή άλλα Καύσιμα Χαμηλού Σημείου Ανάφλεξης (IGF Code) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Επί του παρόντος, η αμμωνία δεν είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο καύσιμο πλοίων αλλά είναι υπό εξέταση, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε περαιτέρω κανονισμούς. Υπάρχει επίσης συνεχής έρευνα για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική αποθήκευση, διανομή και χρήση αμμωνίας επί των πλοίων [41].

3.2.2 Χαρακτηριστικά

Η αμμωνία ή NH_3 είναι μια ένωση που αποτελείται από ένα άτομο αζώτου και τρία άτομα υδρογόνου. Σε θερμοκρασία δωματίου και τυπική ατμοσφαιρική πίεση, είναι ένα άχρωμο αέριο με χαρακτηριστική έντονη, πικάντικη οσμή. Μπορεί να αποθηκευτεί ως υγρό σε υψηλή πίεση ή σε θερμοκρασίες κάτω των -33 βαθμών Κελσίου, και αυτή η κατάσταση προτιμάται ως η πιο κατάλληλη για εφαρμογές καυσίμων.

Ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό της αμμωνίας είναι η τοξικότητά της. Είναι επιβλαβής για την ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας εγκαύματα στο δέρμα και τα μάτια, ενώ αν εισπνευστεί, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στους πνεύμονες. Είναι επίσης διαβρωτική για πολλά υλικά, συμπεριλαμβανομένου του χαλκού και του ψευδαργύρου, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση ειδικών υλικών στους κινητήρες, τις δεξαμενές αποθήκευσης και το δίκτυο καυσίμου. Αυτές οι εκτιμήσεις για την ασφάλεια είναι υψίστης σημασίας σε κάθε συζήτηση σχετικά με τη χρήση της αμμωνίας ως ναυτιλιακού καυσίμου.

Η ενεργειακή πυκνότητα της αμμωνίας ανά όγκο είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι θα απαιτηθούν μεγαλύτερες ή υπό πίεση δεξαμενές αποθήκευσης επί του σκάφους. Ωστόσο, η ενεργειακή πυκνότητα ανά βάρος είναι υψηλή, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα σε ναυτιλιακές εφαρμογές όπου το βάρος μπορεί να είναι κρίσιμος παράγοντας.

Η αμμωνία (NH₃) διαθέτει μοναδικές ιδιότητες που υπαγορεύουν τις απαιτήσεις αποθήκευσης και χειρισμού της:

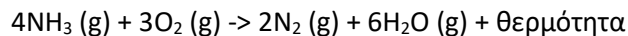
Ως αέριο: Η αμμωνία σε αέρια μορφή αποθηκεύεται συνήθως υπό πίεση για να μειωθεί ο όγκος της για τη μεταφορά και την αποθήκευση. Συνήθως, η αέρια αμμωνία αποθηκεύεται σε πιέσεις 8-10 bar (116-145 psi).

Ως υγρό: Για την αποθήκευση της αμμωνίας σε υγρή μορφή, πρέπει να διατηρείται στο σημείο βρασμού της ή κάτω από αυτό. Η υγρή αμμωνία αποθηκεύεται γενικά σε θερμοκρασία -33°C (-27,4°F) υπό ατμοσφαιρική πίεση. Ωστόσο, όταν αποθηκεύεται υπό πίεση (συνήθως περίπου 10 bar ή 145 psi), το σημείο βρασμού της αυξάνεται, επιτρέποντάς της να παραμείνει ως υγρό σε ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες.

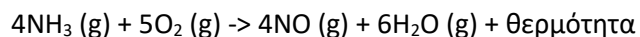
Θερμοκρασία ανάφλεξης: Η αμμωνία έχει σχετικά υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης σε σύγκριση με πολλά άλλα καύσιμα. Η θερμοκρασία αυτανάφλεξής της είναι περίπου 651°C (1204°F). Αυτό σημαίνει ότι παρουσία ενός οξειδωτικού μέσου (όπως ο αέρας), θα πρέπει να φτάσει σε αυτή τη θερμοκρασία για να μπορέσει να αναφλεγεί.

3.2.3 Διαδικασία καύσης

Η καύση της αμμωνίας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και λιγότερο απλή από ό,τι για τα καύσιμα υδρογονανθράκων. Σε ένα τέλειο σενάριο καύσης, η αντίδραση της αμμωνίας με το οξυγόνο παράγει άζωτο, νερό και θερμότητα:



Ωστόσο, η καύση της αμμωνίας συχνά δεν εξελίσσεται τέλεια και μπορεί να παράγει οξείδια του αζώτου (NO_x), που είναι επιβλαβείς ρύποι:



Η παραγωγή NO_x μπορεί να ελεγχθεί και να μειωθεί με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών καύσης και συστημάτων μετεπεξεργασίας.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της καύσης αμμωνίας είναι ότι δεν παράγει CO₂. Αυτό καθιστά την αμμωνία ένα δυνητικό καύσιμο "μηδενικού άνθρακα" που θα μπορούσε να βοηθήσει τη ναυτιλιακή βιομηχανία να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Λόγω των τεχνικών προκλήσεων της καύσης αμμωνίας σε κινητήρα εσωτερικής καύσης, μια άλλη επιλογή που διερευνάται είναι η χρήση αμμωνίας σε κυψέλες καυσίμου. Αυτό συνεπάγεται μια διαφορετική διαδικασία, όπου η χημική ενέργεια της αμμωνίας μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, με το άζωτο και το νερό να είναι τα μόνα παραπροϊόντα.

3.2.4 Εκπομπές ρύπων

Η καύση αμμωνίας δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), καθιστώντας την μια ελκυστική επιλογή για την απαλλαγή από τον άνθρακα στη ναυτιλία. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε ήδη, η καύση μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή οξειδίων του αζώτου (NO_x), τα οποία είναι ρύποι που ρυθμίζονται από τον IMO βάσει της Σύμβασης MARPOL. Τα σύγχρονα σχέδια κινητήρων και οι τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση και μείωση αυτών των εκπομπών [42].

Όπως και άλλα εναλλακτικά καύσιμα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης αμμωνίας πρέπει να αξιολογούνται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής, από την παραγωγή έως την καύση. Εάν παράγεται χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή πηγές ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, η αμμωνία μπορεί να είναι καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ή ουδέτερου άνθρακα. Ωστόσο, η περισσότερη αμμωνία που διατίθεται σήμερα στο εμπόριο παράγεται από φυσικό αέριο, το οποίο έχει σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα.

3.2.5 Εγκατάσταση συστήματος

Αποθήκευση σε πλοία: Η αμμωνία στα πλοία αποθηκεύεται κυρίως ως υγρό λόγω της πυκνής ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας σε σχετικά μέτρια πίεση. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο όγκος αποθήκευσης και ενδείκνυται για εφαρμογές επί του πλοίου. Οι δεξαμενές κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από ανοξείδωτο χάλυβα ή ανθρακούχο χάλυβα με κατάλληλες επενδύσεις για την αποφυγή τυχόν διάβρωσης.

Τοποθέτηση δεξαμενών: Ανάλογα με τον σχεδιασμό και το μέγεθος του πλοίου, οι δεξαμενές αποθήκευσης αμμωνίας μπορούν να τοποθετηθούν κάτω από το κατάστρωμα, συνήθως στους χώρους διπλού πυθμένα, ώστε να αξιοποιείται αποτελεσματικά η χωρητικότητα του πλοίου σε νεκρό βάρος και να διασφαλίζεται η ασφάλεια (εικόνα 18). Σε ορισμένα σχέδια μπορεί επίσης να εξεταστεί η τοποθέτηση στο κατάστρωμα, ιδίως για πλοία που έχουν μετασκευαστεί εκ των υστέρων ή όπου ο χώρος του κύτους είναι περιορισμένος.

Ανεφοδιασμός: Ο ανεφοδιασμός με αμμωνία είναι ανάλογος με τις διαδικασίες ανεφοδιασμού για υγρά καύσιμα, με επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας λόγω της τοξικής φύσης της αμμωνίας. Εξειδικευμένοι σταθμοί ανεφοδιασμού, εξοπλισμένοι με εξοπλισμό συγκράτησης διαρροών και ασφαλείας, μεταφέρουν

υγρή αμμωνία από τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης στις δεξαμενές του πλοίου μέσω ενισχυμένων και μονωμένων σωλήνων.



Εικόνα 17: Concept design για πλοίο με καύσιμο LNG έτοιμο για χρήση αμμωνίας από την NYK Line [43]

Διαθεσιμότητα κινητήρων αμμωνίας: Γίνονται συνεχείς προσπάθειες για την ανάπτυξη κινητήρων εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) που μπορούν να λειτουργούν τόσο με αέρια όσο και με υγρή αμμωνία. Οι προκλήσεις που συνδέονται με τη χρήση αμμωνίας σε ΜΕΚ περιλαμβάνουν την υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης και τη χαμηλή ταχύτητα φλόγας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, μικρές ποσότητες πιλοτικών καυσίμων, όπως το υδρογόνο ή το ντίζελ, μπορούν να χορηγούνται ταυτόχρονα για να εξασφαλιστεί αξιόπιστη ανάφλεξη. Αν και η καύση της αμμωνίας παράγει πράγματι θερμότητα και όχι άμεσο έργο (ενέργεια), αυτή η θερμότητα είναι που κινεί τα έμβολα στις ΜΕΚ, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια σε μηχανικό έργο, παρόμοια με τους συμβατικούς κινητήρες.

Κυψέλες καυσίμου: Όταν η αμμωνία χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου, η χημική ενέργεια της αμμωνίας μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Στις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου υψηλής θερμοκρασίας (SOFC - solid oxide fuel cell), η αμμωνία υφίσταται μια διαδικασία που ονομάζεται "πυρόλυση", όπου διαχωρίζεται σε υδρογόνο και άζωτο. Το υδρογόνο που προκύπτει αντιδρά στη συνέχεια με το οξυγόνο του αέρα, παράγοντας νερό και ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία αυτή παρακάμπτει το στάδιο της καύσης, μετατρέποντας τη χημική ενέργεια

απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, καθιστώντας την πιο αποδοτική από τις συμβατικές διαδικασίες καύσης. Δεν μετατρέπει απλώς το νερό που παράγεται κατά την καύση σε υδρογόνο, αλλά εκμεταλλεύεται άμεσα το χημικό δυναμικό της αμμωνίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακολουθούν μερικά αξιοσημείωτα έργα που σχετίζονται με την πρόωση με καύσιμο αμμωνία:

"ShipFC": Αυτό το ευρωπαϊκό έργο έχει ως στόχο την εγκατάσταση και λειτουργία της πρώτης κυψέλης καυσίμου που λειτουργεί με αμμωνία σε πλοίο (εικόνα 19). Το πλοίο που επιλέχθηκε είναι το υπεράκτιο εφοδιαστικό πλοίο "Viking Energy", το οποίο ανήκει στην Eidesvik και είναι συμβεβλημένο με την Equinor. Το έργο σκοπεύει να θέσει το πλοίο σε λειτουργία με κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με αμμωνία για μεγάλη διάρκεια, ενδεχομένως έως και ένα ολόκληρο έτος, αποδεικνύοντας έτσι τη σκοπιμότητα της αμμωνίας ως ναυτιλιακού καυσίμου.

Συνεργασία MAN Energy Solutions & MHI-MME: Η MAN Energy Solutions ανακοίνωσε τη συνεργασία της με την Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery & Equipment (MHI-MME) για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων ανάπτυξης ενός κινητήρα αμμωνίας για ναυτικές εφαρμογές. Αυτή η κοινή προσπάθεια υπογραμμίζει την προσπάθεια της βιομηχανίας να χρησιμοποιήσει βιώσιμα και μηδενικών εκπομπών καύσιμα, και παρόλο που δεν έχει παρουσιαστεί δημόσια ένα συγκεκριμένο σχέδιο πλοίου, η συνεργασία υποδηλώνει μια ισχυρή ώθηση προς την κατεύθυνση της υλοποίησης πλοίων που κινούνται με αμμωνία.



Εικόνα 18: Το χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ έργο Ship FC [44]

3.3 Υδρογόνο

3.3.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Επί του παρόντος, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) δεν διαθέτει ειδικούς κανονισμούς για τη χρήση του υδρογόνου ως ναυτιλιακό καύσιμο. Ωστόσο, αυτό είναι πιθανό να αλλάξει καθώς ο κλάδος της ναυτιλίας κινείται προς πιο βιώσιμες επιλογές καυσίμων. Ο Διεθνής Κώδικας Ασφαλείας για πλοία (IGF Code), ο οποίος διέπει τη χρήση καυσίμων χαμηλού σημείου ανάφλεξης, όπως το ΥΦΑ, θα χρησιμεύσει πιθανώς ως βάση για μελλοντικούς κανονισμούς που αφορούν το υδρογόνο [45].

3.3.2 Χαρακτηριστικά

Το υδρογόνο (H_2) είναι το ελαφρύτερο και απλούστερο στοιχείο του περιοδικού πίνακα. Είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο σε κανονική θερμοκρασία και πίεση. Αυτές οι ιδιότητες το καθιστούν αόρατο στις ανθρώπινες αισθήσεις, απαιτώντας ειδικούς αισθητήρες για την ανίχνευση τυχόν διαρροών.

Το υδρογόνο έχει πολύ μεγάλο εύρος ευφλεκτότητας στον αέρα (μεταξύ 4% και 75% κατ' όγκο) και η ενέργεια ανάφλεξής του είναι μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη από εκείνη του φυσικού αερίου, καθιστώντας το εξαιρετικά εύφλεκτο και δυνητικά εκρηκτικό σε ορισμένες συνθήκες. Αυτό δημιουργεί ορισμένους κινδύνους για την ασφάλεια που πρέπει να αντιμετωπιστούν προσεκτικά.

Όσον αφορά το ενεργειακό περιεχόμενο, το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από όλα τα γνωστά καύσιμα - τρεις φορές υψηλότερο από τη βενζίνη και το ντίζελ. Ωστόσο, ανά μονάδα όγκου, το ενεργειακό του περιεχόμενο είναι σχετικά χαμηλό, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτεί μεγάλο όγκο αποθήκευσης, μια πρόκληση για τη χρήση του σε θαλάσσιες εφαρμογές. Πρέπει να αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση (έως 700 bar) ή κρυογονικά ως υγρό υδρογόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-253 βαθμούς Κελσίου), γεγονός που απαιτεί εξειδικευμένα και ακριβά συστήματα αποθήκευσης και χειρισμού.

Το υδρογόνο δεν είναι τοξικό, αλλά μπορεί να δράσει ως απλό ασφυξιογόνο εκτοπίζοντας το οξυγόνο σε κλειστούς χώρους. Επίσης, θρυμματίζει ορισμένους τύπους μετάλλων, ένα φαινόμενο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των κινητήρων και των συστημάτων καυσίμου.

Αποθήκευση του υδρογόνου:

Συμπιεσμένο υδρογόνο: Όταν το υδρογόνο αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση, συνήθως αποθηκεύεται σε πιέσεις έως και 700 bar (ή 70 MPa). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συμπίεσης, η θερμοκρασία του

υδρογόνου θα αυξηθεί λόγω της θερμότητας συμπίεσης, αλλά αφού αποθηκευτεί, η θερμοκρασία θα εξισορροπηθεί με το περιβάλλον, εκτός αν ψυχθεί ενεργά.

Υγρό υδρογόνο (κρυογονική αποθήκευση): Το υδρογόνο μπορεί να υγροποιηθεί με ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, συγκεκριμένα γύρω στους -253°C (-423°F). Σε αυτή την υγρή κατάσταση, αποθηκεύεται σε σχετικά χαμηλές πιέσεις, συνήθως κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση, σε θερμομονωμένα δοχεία για να διατηρηθεί η κρυογονική του κατάσταση.

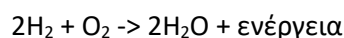
Χρήση σε κινητήρες εσωτερικής καύσης: Πριν το υδρογόνο εισέλθει σε μια ΜΕΚ, συνήθως θερμαίνεται από την κατάσταση αποθήκευσης, είτε συμπιεσμένη είτε κρυογονική. Εάν το υδρογόνο αποθηκεύεται κρυογονικά, θα πρέπει να θερμανθεί σε αέρια κατάσταση πριν από την έγχυση στον κινητήρα. Η ακριβής θερμοκρασία μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος, αλλά πιθανότατα θα είναι πάνω από το σημείο βρασμού του και κάτω από το περιβάλλον, ώστε να διασφαλιστεί ότι παραμένει στην αέρια μορφή του.

Το υδρογόνο έχει θερμοκρασία ανάφλεξης στον αέρα περίπου 500°C (932°F). Αξίζει να σημειωθεί ότι το υδρογόνο έχει ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας στον αέρα, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και σε συγκεντρώσεις τόσο χαμηλές όσο το 4% και τόσο υψηλές όσο το 75% κατ' όγκο, μπορεί να αναφλεγεί.

Η χρήση υδρογόνου σε θαλάσσιες εφαρμογές, ιδίως σε ΜΕΚ, απαιτεί προσεκτική διαχείριση των διαδικασιών αποθήκευσης, παράδοσης και καύσης, ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η αποδοτικότητα.

3.3.3 Διαδικασία καύσης

Η διαδικασία καύσης του υδρογόνου σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι παρόμοια με εκείνη των άλλων καυσίμων: το αέριο υδρογόνο αναμιγνύεται με αέρα, συμπιέζεται και στη συνέχεια αναφλέγεται για να παραχθεί αέριο υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης που κινεί τα έμβολα του κινητήρα. Η αντίδραση καύσης μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής:



Αυτό σημαίνει ότι για κάθε δύο μόρια υδρογόνου καταναλώνεται ένα μόριο οξυγόνου και παράγονται δύο μόρια νερού (μαζί με ένα σημαντικό ποσό ενέργειας). Αυτοί οι υδρατμοί είναι η μόνη άμεση εκπομπή από την καύση του υδρογόνου, καθιστώντας το ένα πολύ καθαρό καύσιμο.

Μια ιδιαίτερη πτυχή της καύσης του υδρογόνου είναι η υψηλή ταχύτητα της φλόγας και η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ένα φαινόμενο γνωστό ως "χτύπημα" στους κινητήρες. Αυτό μπορεί να μετριαστεί με προσεκτικό σχεδιασμό και λειτουργία του κινητήρα.

Εκτός από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, το υδρογόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου, οι οποίες μετατρέπουν άμεσα τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, με μοναδικό παραπροϊόν το νερό και τη θερμότητα. Οι κυψέλες καυσίμου είναι πολύ αποδοτικές και έχουν το πλεονέκτημα των μηδενικών επιβλαβών εκπομπών στο σημείο χρήσης, αλλά απαιτούν καθαρό υδρογόνο και είναι πιο πολύπλοκες και ακριβές από τους παραδοσιακούς κινητήρες.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ενώ η καύση του υδρογόνου είναι καθαρή, η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να συνδέεται με σημαντικές εκπομπές, ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται. Το "πράσινο" υδρογόνο που παράγεται με τη χρήση ανανεώσιμης ενέργειας μέσω ηλεκτρόλυσης είναι η καθαρότερη μορφή, αλλά επί του παρόντος, το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου παράγεται από φυσικό αέριο σε μια διαδικασία που εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του υδρογόνου ως ναυτιλιακό καύσιμο.

3.3.4 Εκπομπές ρύπων

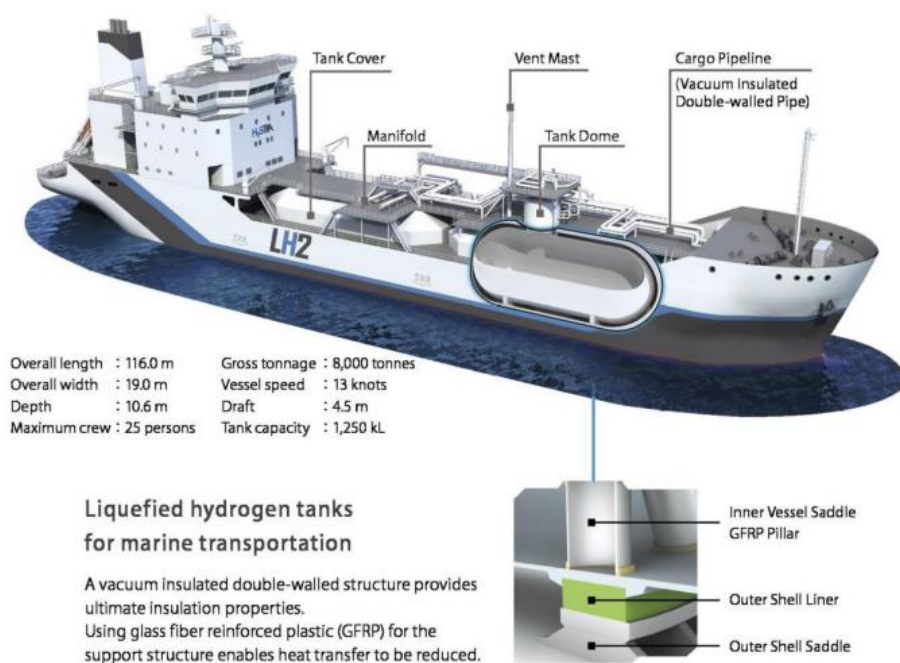
Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του υδρογόνου ως καυσίμου είναι ότι δεν παράγει καθόλου εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την καύση του. Από την καύση του υδρογόνου προκύπτουν υδρατμοί, γεγονός που το καθιστά εξαιρετικά καθαρή πηγή ενέργειας. Στις κυψέλες καυσίμου η διαδικασία δεν παράγει οξείδια του αζώτου (NOx), αλλά στις μηχανές εσωτερικής καύσης μπορεί να προκύψει παραγωγή NOx λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καύσης. Οι εκπομπές αυτές, ωστόσο, είναι πολύ χαμηλότερες από εκείνες που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων [46].

3.3.5 Εγκατάσταση συστήματος

Αποθήκευση σε πλοία: Το υδρογόνο αποθηκεύεται συνήθως με έναν από τους δύο τρόπους: ως συμπιεσμένο αέριο ή ως κρυογονικό υγρό (εικόνα 20). Η επιλογή μεταξύ αυτών των μεθόδων αποθήκευσης εξαρτάται από τις ειδικές ανάγκες του πλοίου, τον διαθέσιμο όγκο για τις δεξαμενές και τη διάρκεια μεταξύ των ανεφοδιασμών. Για την αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου χρησιμοποιούνται δεξαμενές από σύνθετα υλικά υψηλής αντοχής για την αντιμετώπιση της υψηλής πίεσης, ενώ η αποθήκευση κρυογονικού υγρού υδρογόνου απαιτεί δεξαμενές με διπλά τοιχώματα και μόνωση κενού για τη διατήρηση των εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών.

Τοποθεσία δεξαμενών: Οι δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου μπορούν να τοποθετηθούν κάτω από το κατάστρωμα, ενσωματωμένες στη δομή του πλοίου, ή στο κατάστρωμα, ιδίως για μεγαλύτερα συστήματα αποθήκευσης ή εκ των υστέρων εξοπλισμένα πλοία. Η ακριβής θέση εξαρτάται συχνά από τον σχεδιασμό του πλοίου, την ασφάλεια και το διαθέσιμο χώρο.

Ανεφοδιασμός: Οι διαδικασίες ανεφοδιασμού με υδρογόνο εξελίσσονται με την πρόοδο της τεχνολογίας. Συνήθως, ο ανεφοδιασμός με συμπιεσμένο υδρογόνο χρησιμοποιεί συνδέσμους και εύκαμπτους σωλήνες υψηλής πίεσης, παρόμοια με τον ανεφοδιασμό οχημάτων με φυσικό αέριο, αλλά σε πολύ υψηλότερες πιέσεις. Για το υγρό υδρογόνο, η μεταφορά είναι παρόμοια με άλλα κρυογονικά καύσιμα, απαιτώντας ειδικούς κρυογονικούς σωλήνες και συνδέσμους. Οι σταθμοί ανεφοδιασμού πρέπει να διαθέτουν μέτρα ασφαλείας λόγω του μεγάλου εύρους ευφλεκτότητας του υδρογόνου.



Source: HySTRA.

Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου υδρογόνου χωρητικότητας 1,250 m³ [47]

Διαθεσιμότητα κινητήρων υδρογόνου: Υπάρχουν κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου (ΜΕΚ). Οι κινητήρες αυτοί είναι τροποποιημένες εκδόσεις των παραδοσιακών κινητήρων βενζίνης ή ντίζελ, προσαρμοσμένες για την καύση αερίου υδρογόνου.

Κυψέλες καυσίμου: Μια άλλη συνήθης εφαρμογή του υδρογόνου στα πλοία είναι οι κυψέλες καυσίμου, όπου το υδρογόνο συνδυάζεται με οξυγόνο για την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με μοναδικό παραπροϊόν το νερό.

Ρύθμιση της θερμοκρασίας: Όταν το υδρογόνο αποθηκεύεται ως κρυογονικό υγρό, πρέπει να θερμανθεί πριν χρησιμοποιηθεί σε μια MEK ή κυψέλη καυσίμου. Αυτή η θέρμανση γίνεται συχνά με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούν το θαλασσινό νερό του περιβάλλοντος ή τη θερμότητα των αποβλήτων του πλοίου για να αυξήσουν σταδιακά τη θερμοκρασία του υδρογόνου. Το υδρογόνο θα μεταβεί από υγρή σε αέρια κατάσταση και θα φθάσει σε κατάλληλη θερμοκρασία για την εισαγωγή του στον κινητήρα ή στην κυψέλη καυσίμου. Η κατάλληλη ρύθμιση της πίεσης και της θερμοκρασίας εξασφαλίζει την αποτελεσματική και ασφαλή χρήση του υδρογόνου.

Ακολουθούν παραδείγματα πλοίων που λειτουργούν ή πρόκειται να λειτουργήσουν με καύσιμο υδρογόνο:

Hydroville passenger ferry: Το Hydroville είναι το πρώτο διαπιστευμένο επιβατικό σκάφος στον κόσμο που λειτουργεί με υδρογόνο από το 2017 σε κινητήρα εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου. Σχεδιάστηκε από τη βελγική εταιρεία CMB Technologies ως επιβατηγό πλοίο για τη μεταφορά εργαζομένων από την πόλη της Αμβέρσας στην περιοχή του λιμανιού. Το Hydroville αποθηκεύει υδρογόνο σε συμπιεσμένη μορφή, χρησιμοποιώντας 2 δεξαμενές υψηλής πίεσης 200bar, των 205l η κάθε μια, και δύο εφεδρικές δεξαμενές. Η υποδομή ανεφοδιασμού δημιουργήθηκε κοντά στο λιμάνι για τις τακτικές λειτουργίες του σκάφους.

HyShips: Χρηματοδοτούμενο από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας "Ορίζοντας 2020" της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το έργο HyShips έχει ως στόχο να ανοίξει το δρόμο για σκάφη που κινούνται με υδρογόνο στα ευρωπαϊκά ύδατα (εικόνα 21). Στο πλαίσιο του έργου, ένα νορβηγικό οχηματαγωγό πλοίο και ένα φορτηγό πλοίο μικρών αποστάσεων σχεδιάζεται να μετατραπούν ώστε να λειτουργούν με υδρογόνο. Το έργο σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει δεξαμενές αποθήκευσης υγρού υδρογόνου, δεδομένης της μεγαλύτερης διάρκειας λειτουργίας των εμπλεκόμενων πλοίων. Η πρωτοβουλία περιλαμβάνει επίσης την ανάπτυξη μιας αλυσίδας εφοδιασμού υδρογόνου και υποδομής ανεφοδιασμού για θαλάσσια χρήση.

Τα έργα αυτά σηματοδοτούν το αυξανόμενο ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως βιώσιμο και καθαρό καύσιμο για τη ναυτιλία, υποδηλώνοντας μια ευρύτερη υιοθέτηση στο εγγύς μέλλον.

Topeka; 2,500 m² open deck RoRo vessels fueled by liquid hydrogen

Design: LMG Marin



Main dimensions: L: 125 m B: 24 m
Cargo capacity: 56 semi trailers
Speed in service: 12 knots
LH2 tank capacity; 65 – 100 cbm

Power demand, normal operation
Installed Fuel Cell capacity:
Daily LH2 consumption in operation:
Range/Endurance:

app. 2 MW
app. 3 MW
1,2 – 1,4 t/d
app 400 nm



- KONFIDENSIELT -



Εικόνα 20: Σχηματικό διάγραμμα εφαρμογής του έργου HySHIP σε οχηματαγωγό πλοίο RoRo [48]

3.4 Βιοκαύσιμα

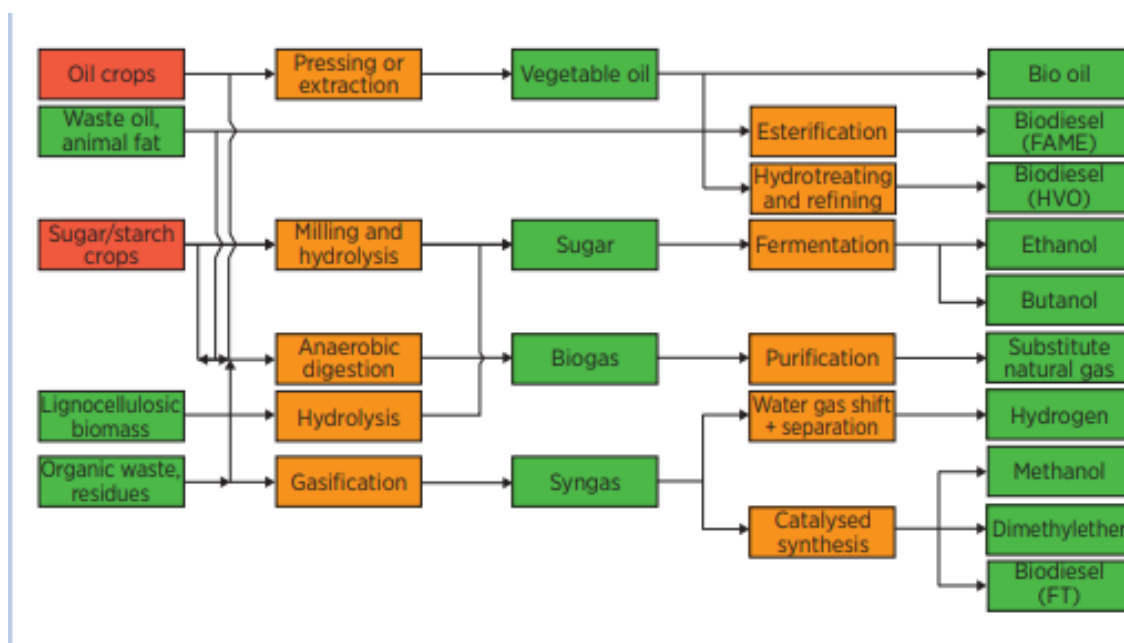
3.4.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Τα βιοκαύσιμα προέρχονται από οργανικά υλικά και αποτελούν ένα εναλλακτικό καύσιμο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που έχει οδηγήσει σε διάφορες νομοθετικές ρυθμίσεις σε παγκόσμιο επίπεδο. Η Ευρωπαϊκή Ένωση εισήγαγε την οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας RED II, όπως ήδη αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 2.3.1. Σύμφωνα με την οδηγία, τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίσουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό τους μείγμα και να θεσπίσουν κριτήρια για τη βιωσιμότητα των βιοκαυσίμων. Ομοίως, οι ΗΠΑ έχουν το πρότυπο ανανεώσιμων καυσίμων (RFS), το οποίο εποπτεύεται από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος και επιβάλλει έναν ορισμένο όγκο ανανεώσιμων καυσίμων στον τομέα των μεταφορών. Η Εθνική Πολιτική Βιοκαυσίμων της Βραζιλίας, RenovaBio, δίνει έμφαση στην επέκταση των βιοκαυσίμων στο ενεργειακό χαρτοφυλάκιο της χώρας, θέτοντας ετήσιους στόχους απαλλαγής από τον άνθρακα για τα καύσιμα. Εν τω μεταξύ, η Εθνική Πολιτική Βιοκαυσίμων της Ινδίας ενθαρρύνει την ανάμειξη βιοκαυσίμων και δημιουργεί αλυσίδες εφοδιασμού για το βιοντίζελ. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO), αν και δεν έχει ρητές απαιτήσεις για βιοκαύσιμα, προωθεί έμμεσα τη χρήση καθαρών καυσίμων στις θαλάσσιες μεταφορές. Ωστόσο, αυτές οι νομοθετικές προσπάθειες αντιμετωπίζουν προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της

διασφάλισης της βιωσιμότητας στην παραγωγή βιοκαυσίμων, της τεχνικής συμβατότητας και της οικονομικής βιωσιμότητας [24].

3.4.2 Χαρακτηριστικά

Τα βιοκαύσιμα είναι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που προέρχονται από οργανική ύλη και χρησιμοποιούνται συχνά ως υποκατάστατα των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων. Μπορούν να παραχθούν από διάφορες πρώτες ύλες, συμπεριλαμβανομένων καλλιεργειών όπως το καλαμπόκι και το ζαχαροκάλαμο, καθώς και από φύκια και γεωργικά υπολείμματα. Τυπικά κατηγοριοποιούνται σε πρώτη, δεύτερης και τρίτης γενιάς, με βάση τις διαδικασίες παραγωγής και τα προφίλ βιωσιμότητάς τους.



Εικόνα 21: Διάγραμμα της διαδικασίας παραγωγής συμβατικών και προηγμένων βιοκαυσίμων [49]

Τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς, όπως η αιθανόλη και το βιοντίζελ, εξάγονται απευθείας από καλλιέργειες τροφίμων, ενώ τα βιοκαύσιμα δεύτερης και τρίτης γενιάς θεωρούνται μη διατροφική βιομάζα ή προέρχονται από προηγμένες βιοτεχνολογικές διεργασίες. Αν και τα βιοκαύσιμα προσφέρουν πιθανή μείωση του άνθρακα λόγω της φυσικής απορρόφησης άνθρακα από τα φυτά κατά την ανάπτυξή τους, εξακολουθούν να υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με τον ανταγωνισμό της γης με τις καλλιέργειες τροφίμων, τη χρήση νερού και τις συνολικές εκπομπές του κύκλου ζωής. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι συνήθως χαμηλότερη από τα συμβατικά καύσιμα και ενδέχεται να απαιτούν τροποποιήσεις στα υπάρχοντα συστήματα κινητήρων για να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά. Η διαδικασία παραγωγής

διαφόρων συμβατικών και προηγμένων βιοκαυσίμων απεικονίζεται διαγραμματικά στην εικόνα 22, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται τα πιο γνωστά βιοκαύσιμα.

Αιθανόλη:

Πηγή: Η αιθανόλη προέρχεται κυρίως από καλλιέργειες αμύλου, όπως το καλαμπόκι, το ζαχαροκάλαμο και το σιτάρι.

Διαδικασία παραγωγής: Μέσω της ζύμωσης των σακχάρων που υπάρχουν στην αρχική καλλιέργεια. Η αιθανόλη με βάση το ζαχαροκάλαμο παράγεται με τη ζύμωση του χυμού ζάχαρης που εξάγεται από το ζαχαροκάλαμο, ενώ η αιθανόλη με βάση το καλαμπόκι χρησιμοποιεί τα άμυλα του σπόρου, τα οποία μετατρέπονται πρώτα σε σάκχαρα.

Βιοντίζελ:

Πηγή: Το βιοντίζελ παράγεται από φυτικά έλαια, ζωικά λίπη και ανακυκλωμένο μαγειρικό λίπος.

Διαδικασία παραγωγής: Η μετεστεροποίηση είναι η κύρια διαδικασία παραγωγής, όπου η γλυκερίνη διαχωρίζεται από το λίπος ή το φυτικό έλαιο, με αποτέλεσμα να προκύπτουν δύο προϊόντα: μεθυλεστέρες (αλλιώς η χημική ονομασία του βιοντίζελ) και γλυκερίνη, ένα πολύτιμο υποπροϊόν.

Προηγμένα βιοκαύσιμα (δεύτερης γενιάς):

Πηγή: Παράγονται από μη διατροφικές καλλιέργειες, όπως switchgrass, αστικά απόβλητα ή γεωργικά υπολείμματα όπως άχυρο ή ξυλοτεμαχίδια.

Διαδικασία παραγωγής: Κυτταρινούχες πρώτες ύλες υποβάλλονται πρώτα σε προεπεξεργασία για να διασπαστεί η λιγνίνη και να απελευθερωθούν οι πολυσακχαρίτες. Αυτοί οι πολυσακχαρίτες υδρολύονται στη συνέχεια σε σάκχαρα, τα οποία μπορούν να ζυμωθούν για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Βιοκαύσιμα από φύκια (τρίτης γενιάς):

Διαδικασία παραγωγής: Τα μικροφύκη παράγουν λιπίδια, υδατάνθρακες και πρωτεΐνες, τα οποία μπορούν να μετατραπούν σε βιοκαύσιμα χρησιμοποιώντας διάφορες διεργασίες. Η εξαγωγή ελαίου από τα συγκομισμένα φύκια ακολουθείται από μετεστεροποίηση για την παραγωγή βιοντίζελ. Εναλλακτικά, ολόκληρη η βιομάζα των φυκιών μπορεί να μετατραπεί σε βιοέλαιο μέσω διεργασιών όπως η πυρόλυση ή η αεριοποίηση.

Βιοβουτανόλη:

Πηγή: Παρασκευάζεται από τις ίδιες πρώτες ύλες με την αιθανόλη, συμπεριλαμβανομένου του καλαμποκιού και του ζαχαροκάλαμου.

Διαδικασία παραγωγής: Κατάλληλη επεξεργασία του βακτηριδίου *Clostridium acetobutylicum*, από την οποία παράγεται βουτανόλη μαζί με αιθανόλη και ακετόνη.

Βιοκαύσιμα drop-in:

Πηγή: Βιομάζα, συμπεριλαμβανομένου των υπολειμμάτων ξυλώδους καλλιέργειας, ειδικών ενεργειακών καλλιεργειών ή ακόμη και φυκιών.

Διαδικασία παραγωγής: Η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει συνήθως θερμοχημικές οδούς, συμπεριλαμβανομένης της αεριοποίησης που ακολουθείται από σύνθεση Fischer-Tropsch ή πυρόλυση για την παραγωγή βιοελαίου. Τα βιοκαύσιμα drop-in είναι πλήρως συμβατά με τους υπάρχοντες κινητήρες, αγωγούς και υποδομές.

Τα διάφορα βιοκαύσιμα έχουν διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο, προφίλ εκπομπών και άλλα χαρακτηριστικά, αλλά το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι ότι όλα προέρχονται από ανανεώσιμες, βιολογικές πηγές σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.

3.4.3 Διαδικασία καύσης

Η διαδικασία καύσης των βιοκαυσίμων είναι παρόμοια με εκείνη των συμβατικών ορυκτών καυσίμων, αλλά με ορισμένα μοναδικά χαρακτηριστικά λόγω της ξεχωριστής χημικής σύνθεσης των βιοκαυσίμων. Τα βιοκαύσιμα, που προέρχονται από βιολογικές πηγές, περιέχουν κυρίως ενώσεις όπως υδατάνθρακες, λίπη και πρωτεΐνες. Όταν καίγονται, αυτά τα οργανικά μόρια αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα, απελευθερώνοντας ενέργεια με τη μορφή θερμότητας και φωτός. Τα κύρια προϊόντα της πλήρους καύσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το νερό (H_2O). Ωστόσο, η ακριβής σύνθεση των εκπομπών μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του βιοκαυσίμου και την πηγή του.

Καύση βιοντίζελ: Το βιοντίζελ παρασκευάζεται από μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (FAME) που προέρχονται από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη. Κατά την καύση του, το βιοντίζελ απελευθερώνει λιγότερα σωματίδια, μονοξείδιο του άνθρακα και άκαυστους υδρογονάνθρακες σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ. Ωστόσο, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου ενδέχεται να είναι ελαφρώς υψηλότερες.

Καύση αιθανόλης: Η αιθανόλη, που συνήθως προέρχεται από ζυμωμένα σάκχαρα και άμυλα, καίγεται πιο καθαρά από τη βενζίνη. Έχει υψηλότερο αριθμό οκτανίων και μπορεί να μειώσει τις επιβλαβείς εκπομπές καυσαερίων. Όταν αναμειγνύεται με βενζίνη, η αιθανόλη μπορεί επίσης να μειώσει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα.

Καύση βιοκαυσίμων από φύκια: Τα βιοκαύσιμα από φύκια προέρχονται από τα έλαια που παράγονται από ορισμένα στελέχη φυκιών. Τα χαρακτηριστικά καύσης είναι παρόμοια με εκείνα του βιοντίζελ, αλλά οι ακριβείς ιδιότητες μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το συγκεκριμένο στέλεχος άλγης και τις μεθόδους επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται.

Καύση βιοαερίου και βιοσυναερίου: Το βιοαέριο, κυρίως μεθάνιο (CH_4) που λαμβάνεται από την αναερόβια χώνευση οργανικής ύλης, καίγεται παρόμοια με το φυσικό αέριο, παράγοντας CO_2 και H_2O . Το βιοσυναέριο, ένα μείγμα υδρογόνου (H_2), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και CH_4 που λαμβάνεται από την αεριοποίηση της βιομάζας, μπορεί να καεί άμεσα ή να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία για την παραγωγή άλλων καυσίμων.

Ακριβώς όπως και σε άλλα καύσιμα, η πλήρης καύση των βιοκαυσίμων λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει αρκετό οξυγόνο, με αποτέλεσμα την παραγωγή CO_2 και H_2O . Η ατελής καύση, λόγω ανεπαρκούς οξυγόνου, μπορεί να οδηγήσει σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO), σωματίδια και άλλες εκπομπές. Η αποτελεσματική καύση των βιοκαυσίμων απαιτεί επίσης βελτιστοποίηση των παραμέτρων του κινητήρα και μερικές φορές τροποποιήσεις στον ίδιο τον κινητήρα, όταν λειτουργεί με μείγμα συμβατικού καυσίμου και βιοκαυσίμου σε υψηλό ποσοστό ή με αμιγώς βιοκαύσιμο.

3.4.4 Εκπομπές ρύπων

Αν και τα βιοκαύσιμα απελευθερώνουν CO_2 κατά την καύση, αυτό αντισταθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από το CO_2 που απορροφάται κατά την ανάπτυξη της πρώτης ύλης τους, καθιστώντας τα σχεδόν ουδέτερα ως προς τον άνθρακα. Γενικά, η χρήση βιοκαυσίμων μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, άκαυστων υδρογονανθράκων και σωματιδίων. Ανάλογα με την πρώτη ύλη και τις μεθόδους επεξεργασίας, τα βιοκαύσιμα μπορούν επίσης να παράγουν εκπομπές όπως οξειδία του αζώτου (NO_x), πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) και σωματίδια, αν και συνήθως σε διαφορετικά επίπεδα από τα αντίστοιχα ορυκτά καύσιμα. Στην περίπτωση του βιοντίζελ, για παράδειγμα, ενδέχεται να παράγονται ελαφρώς υψηλότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Τα βιοκαύσιμα έχουν συνήθως χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, με αποτέλεσμα ελάχιστες εκπομπές οξειδίων του θείου. Αν και η καύση τους μπορεί να είναι σχετικά καθαρή, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ολόκληρος ο κύκλος ζωής των

βιοκαυσίμων, από την παραγωγή έως την καύση, για να εκτιμηθεί ο συνολικός περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος.

3.4.5 Εγκατάσταση συστήματος

Αποθήκευση: Τα βιοκαύσιμα, κυρίως το βιοντίζελ και το καθαρό φυτικό έλαιο, αποθηκεύονται συνήθως σε υγρή μορφή στα πλοία. Λόγω των παρόμοιων ιδιοτήτων τους με τα καύσιμα ντίζελ, μπορούν να αποθηκευτούν σε συνήθεις δεξαμενές καυσίμων πλοίων κατασκευασμένες από μέταλλο. Αυτό διασφαλίζει τη διατήρηση της ακεραιότητας του βιοκαυσίμου και μειώνει τις πιθανότητες υποβάθμισης.

Τοποθέτηση δεξαμενής: Οι δεξαμενές αποθήκευσης των βιοκαυσίμων τοποθετούνται γενικά κάτω από το κατάστρωμα, παρόμοια με τις συμβατικές δεξαμενές καυσίμων πλοίων. Η θέση αυτή παρέχει προστασία από το άμεσο ηλιακό φως και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες, εξασφαλίζοντας σταθερές θερμοκρασίες του βιοκαυσίμου και αποτρέποντας την υποβάθμιση της ποιότητας.

Διαδικασία ανεφοδιασμού: Ο ανεφοδιασμός των πλοίων με βιοκαύσιμα αντικατοπτρίζει σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία ανεφοδιασμού με το συμβατικό ναυτιλιακό πετρέλαιο. Τα βιοκαύσιμα μπορούν να αντληθούν στις δεξαμενές αποθήκευσης μέσω σωλήνων από πλοία ανεφοδιασμού ή από δεξαμενές καυσίμων στο λιμάνι. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι δεν εισέρχονται μολυσματικοί παράγοντες στο σύστημα κατά τον ανεφοδιασμό, καθώς τα βιοκαύσιμα μπορεί να είναι πιο ευαίσθητα σε μικροβιακή μόλυνση και εισροή νερού από ό,τι ορισμένα ορυκτά καύσιμα. Οι τακτικοί έλεγχοι και τα συστήματα φιλτραρίσματος μπορούν να βοηθήσουν στη διατήρηση της καθαρότητας του βιοκαυσίμου.

Δεδομένου του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στη ναυτιλιακή βιομηχανία, οι υποδομές και οι διαδικασίες για τη χρήση βιοκαυσίμων στα πλοία συνεχίζουν να εξελίσσονται. Ωστόσο, προς το παρόν, οι διαδικασίες αυτές βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε καθιερωμένες πρακτικές διαχείρισης συμβατικών ναυτιλιακών καυσίμων.

Ακολουθούν δύο αξιολογημένα έργα όπου χρησιμοποιήθηκαν βιοκαύσιμα σε πλοία:

Δοκιμή βιοκαυσίμων της Maersk: Το 2021, η βρετανική εταιρεία πετρελαίου και φυσικού αερίου BP και η δανέζικη ναυτιλιακή εταιρεία δεξαμενόπλοιων Maersk Tankers, με την υποστήριξη της Ναυτιλιακής Αρχής της Δανίας, πραγματοποίησαν με επιτυχία ένα δοκιμαστικό ταξίδι των πλοίων Maersk Cirrus and Maersk Navigator. Κάθε σκάφος εφοδιάστηκε με το βιοκαύσιμο BP Marine B30, αποτελούμενο από 30% μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (FAME) αναμεμειγμένο με μαζούτ πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (VLSFO). Το FAME είναι ένα ανανεώσιμο εναλλακτικό καύσιμο (βιοκαύσιμο) που παράγεται σε μεγάλο

βαθμό από ανακυκλωμένα μαγειρικά έλαια και ανανεώσιμες πηγές πετρελαίου. Σύμφωνα με την BP και τη Maersk Tankers, δεν παρατηρήθηκαν δυσμενείς επιπτώσεις στον εξοπλισμό ή τα μηχανήματα κατά τη διάρκεια ή μετά τις δοκιμές. Δεν απαιτήθηκαν τροποποιήσεις στον κινητήρα ή στην υποδομή, γεγονός που αποδεικνύει την καταλληλότητα των βιώσιμων βιοκαυσίμων για χρήση.

Δοκιμή βιοκαυσίμων της Stena Bulk: Το 2020, η Stena Bulk, μια μεγάλη διεθνής ναυτιλιακή εταιρεία δεξαμενόπλοιων, ολοκλήρωσε με επιτυχία ένα δοκιμαστικό ταξίδι του δεξαμενόπλοιου MR Stena Immortal χρησιμοποιώντας βιοκαύσιμο προερχόμενο 100% από χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι. Το καύσιμο, το οποίο επίσης προμηθεύτηκε από την GoodFuels, ανέδειξε τις δυνατότητες των βιοκαυσίμων να λειτουργήσουν ως καύσιμα χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Και τα δύο έργα αναδεικνύουν το αυξανόμενο ενδιαφέρον του κλάδου για τα βιοκαύσιμα ως βιώσιμη εναλλακτική λύση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται μια σύνοψη των εναλλακτικών καυσίμων για τη ναυτιλία.

Πίνακας 2: Σύνοψη εναλλακτικών καυσίμων.

	Μεθανόλη	Αμμωνία	Υδρογόνο	Βιοκαύσιμα
Νομοθεσία κανονισμοί	- Ο κώδικας IGF του IMO ρυθμίζει τη χρήση του. Επί του πλοίου, η ασφάλεια αποθήκευσης και χρήσης υπόκειται στη σύμβαση SOLAS, στον κώδικα ISM και στη MARPOL.	Ο κώδικας IGF του IMO αποτελεί πιθανή βάση για τη ρύθμιση. Δεν χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως, οπότε οι κανονισμοί βρίσκονται υπό ανάπτυξη.	Δεν υπάρχουν ακόμη ειδικοί κανονισμοί του IMO, αλλά είναι πιθανό να αναπτυχθούν με βάση τον κώδικα IGF.	Ποικίλοι κανονισμοί (RED στην ΕΕ, RFS στις ΗΠΑ), ενδεχομένως στο πλαίσιο του IMO μέσω του κώδικα IGF.
Χαρακτηριστικά	Υγρό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, χαμηλότερο σημείο ανάφλεξης από τα παραδοσιακά καύσιμα, λιγότερη	Άχρωμο αέριο με έντονη, πικάντικη οσμή, ιδιαίτερα τοξικό και διαβρωτικό, αποθηκεύεται υπό πίεση ή σε χαμηλή θερμοκρασία.	Άχρωμο, άοσμο, άγευστο αέριο, απαιτεί υψηλή πίεση ή χαμηλή θερμοκρασία για αποθήκευση, εξαιρετικά εύφλεκτο.	Κυμαίνονται από στερεά, υγρά έως αέρια, ανάλογα με τον τύπο. Είναι ανανεώσιμα και βιοδιασπώμενα.

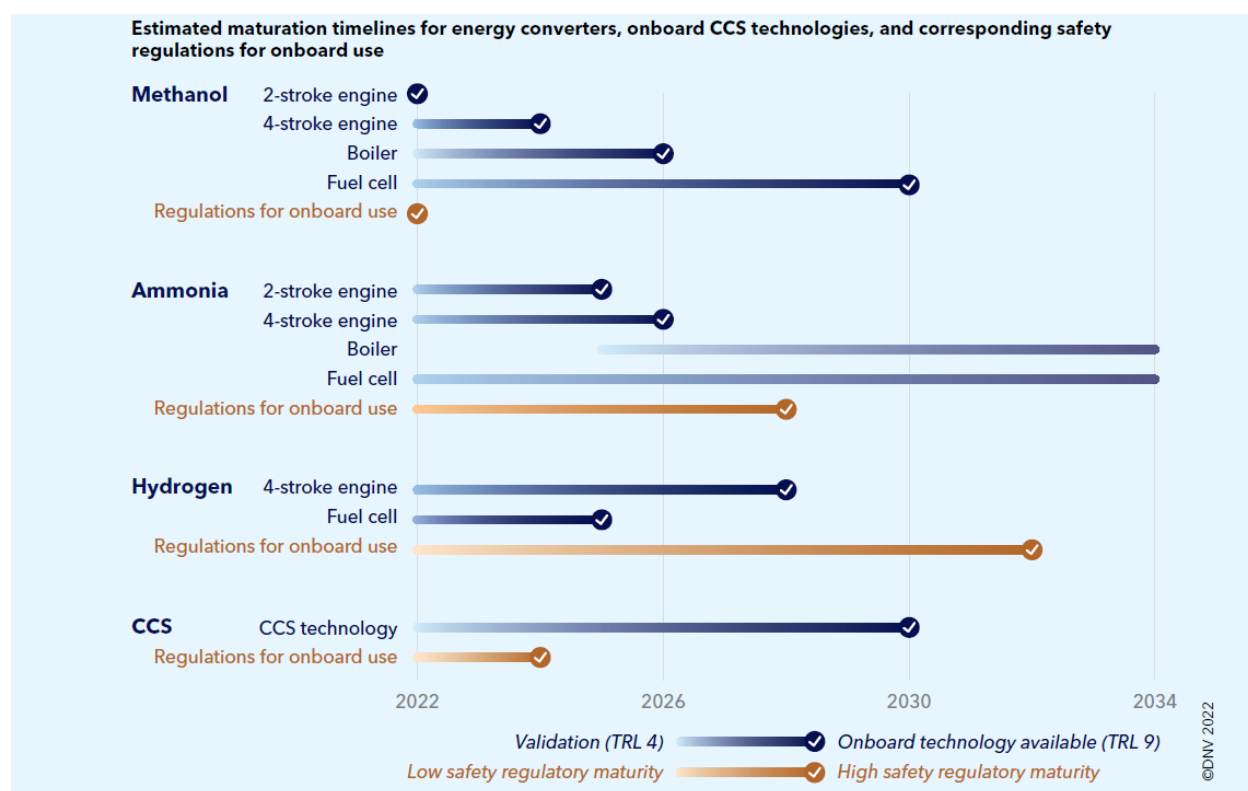
	ενεργειακή πυκνότητα.			
Διαδικασία καύσης	Καίγεται με παρόμοιο τρόπο με το ντίζελ σε μηχανές εσωτερικής καύσης, με αποτέλεσμα την παραγωγή CO ₂ , νερού και ενέργειας.	Καίγονται σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή κυψέλες καυσίμου, παράγοντας άζωτο, νερό και ενέργεια.	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου ή να καεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης, αντιδρά με το οξυγόνο και παράγει νερό και ενέργεια.	Καθαρότερη καύση, παράγει λιγότερους ρύπους.
Εκπομπές ρύπων	Η καύση έχει ως αποτέλεσμα εκπομπές CO ₂ , αλλά χαμηλότερες σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα. Εκλύονται επίσης άλλοι ρύποι όπως SO _x και NO _x , αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα.	Καμία εκπομπή CO ₂ κατά την καύση, αλλά παραγωγή NO _x εάν δεν γίνεται προσεκτική διαχείριση.	Μηδενικές εκπομπές CO ₂ κατά την καύση, δυνατότητα παραγωγής NO _x σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.	Μειωμένες εκπομπές CO ₂ κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, χαμηλότερες εκπομπές SO _x , σωματιδίων- οι εκπομπές NO _x ποικίλλουν.
Βιβλιογραφία	[39]	[41]	[45]	[28]

3.5 Μελλοντικά σενάρια

Τα μπλε καύσιμα αναφέρονται σε πηγές ενέργειας που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, οι οποίες, όταν παράγονται, συνδυάζονται με τεχνικές δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS - Carbon Capture and Storage). Η ιδέα πίσω από τα μπλε καύσιμα είναι να μειωθούν σημαντικά ή ακόμη και να εξαλειφθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που συνδέονται με την καύση των ορυκτών καυσίμων. Η δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα (CCS) είναι μια τεχνολογία που δεσμεύει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην πηγή, όπως σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις, και στη συνέχεια αποθηκεύει αυτό το δεσμευμένο CO₂ βαθιά στο υπέδαφος σε γεωλογικούς σχηματισμούς, διασφαλίζοντας ότι δεν θα εισέλθει στην ατμόσφαιρα. Με την ενσωμάτωση του CCS στην παραγωγή ορυκτών καυσίμων, τα μπλε καύσιμα προσφέρουν μια οδό για τη διατήρηση της χρήσης των παραδοσιακών ενεργειακών πόρων, ενώ παράλληλα διασφαλίζουν ένα ενεργειακό σύστημα με λιγότερες εκπομπές άνθρακα. Η μετάβαση από τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα σε εναλλακτικές

λύσεις με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα είναι στενά συνδεδεμένη με τις εξελίξεις στην τεχνολογία καυσίμων. Με τη δυνατότητα χρήσης εν πλω συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS), ορισμένα πλοία θα μπορούσαν να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα.

Το DNV Maritime Forecast 2050 παρουσιάζει ένα επικαιροποιημένο χρονοδιάγραμμα (εικόνα 23) σχετικά με την πρόοδο και την αναμενόμενη ωριμότητα των τεχνολογιών καυσίμων επί του σκάφους που είναι καθοριστικές για την ενεργειακή μετάβαση. Αυτό το χρονοδιάγραμμα, με βάση τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας (TRL), ρίχνει φως στην ανάπτυξη ενεργειακών μετατροπών συμβατών με μεθανόλη, αμμωνία και υδρογόνο. Η πρόβλεψη κατηγοριοποιεί αυτούς τους μετατροπείς σε δίχρονους κινητήρες, τετράχρονους κινητήρες, βοηθητικούς λέβητες και κυψέλες καυσίμου, ο καθένας με τη σημασία του στον τομέα της ναυτιλίας.



Εικόνα 23: Εκτιμώμενα χρονοδιαγράμματα ωρίμανσης για τα εναλλακτικά καύσιμα και την τεχνολογία CCS επί του σκάφους και των αντίστοιχων κανονισμών ασφαλείας [13]

Η έκθεση τονίζει επίσης ότι οι κανονισμοί ασφαλείας για τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων θα πρέπει να αναπτυχθούν ταυτόχρονα με τις τεχνολογικές εξελίξεις. Το χρονοδιάγραμμα, που εκτείνεται σε 10-12 έτη, προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα των καυσίμων, αλλά δεν εγγυάται ότι όλες οι τεχνολογίες θα

ωριμάσουν εντός αυτής της περιόδου. Διάφοροι παράγοντες, όπως οι υποδομές διανομής, οι τιμές των καυσίμων και οι πολιτικές, θα επηρεάσουν τον πραγματικό ρυθμό υιοθέτησης αυτών των τεχνολογιών. Η πρόβλεψη υπογραμμίζει ότι η επιτυχία του CCS θα απαιτήσει μια ολοκληρωμένη υποδομή που θα υποστηρίζει ολόκληρη την αλυσίδα CO₂. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι, ενώ η έκθεση αναφέρει την τρέχουσα τεχνολογική ετοιμότητα της μεθανόλης που προηγείται της αμμωνίας και του υδρογόνου, δεν περιλαμβάνει το LNG και το LPG, καθώς η τεχνολογία καυσίμων επί του οχήματος θεωρείται ήδη ώριμη.

Γενικά η σημερινή ετήσια παραγωγή αμμωνίας και μεθανόλης, κυρίως ορυκτής προέλευσης, αντιστοιχεί σχεδόν στο 45% των ετήσιων ενεργειακών αναγκών του τομέα της ναυτιλίας. Στην πρόσφατη ναυτιλιακή πρόβλεψη της DNV για το 2050, μια μελέτη αγοράς εντοπίζει 128 έργα που προσανατολίζονται στην παραγωγή πράσινου ή μπλε υδρογόνου, μεθανόλης ή αμμωνίας, όλα πιθανά καύσιμα πλοίων με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα. Τα έργα αυτά στοχεύουν στην παραγωγή ενέργειας 109 εκατομμυρίων τόνων (Mt) ισοδύναμου πετρελαίου μέχρι το 2027. Από τα προγραμματισμένα έργα, 69 βρίσκονται στην Ευρώπη με αναμενόμενη παραγωγή 79 Mt ισοδύναμου πετρελαίου έως το 2027, γεγονός που υποδηλώνει την προοπτική της περιοχής να είναι η πρώτη που θα έχει σημαντική διαθεσιμότητα πράσινων καυσίμων.

Εφόσον υπάρχει επαρκής διαθεσιμότητα ενέργειας και παραγωγική ικανότητα, το τελικό εμπόδιο στην αλυσίδα εφοδιασμού είναι η διαθεσιμότητα υποδομών για τη διανομή και τον εφοδιασμό των εναλλακτικών καυσίμων. Προς το παρόν, υπάρχει ήδη ένα σημαντικό δίκτυο για αμμωνία και μεθανόλη, που μεταφέρει ετησίως περίπου 50 Mt συνολικά και αντιστοιχεί στο 10% σχεδόν της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας στα πλοία. Στην εικόνα 24 παρουσιάζεται η υφιστάμενη υποδομή αποθήκευσης αμμωνίας και μεθανόλης κοντά σε ένα από τα μεγαλύτερα κέντρα ανεφοδιασμού στη Βόρεια Θάλασσα (North Sea).



Εικόνα 24: Υφιστάμενη υποδομή για τον εφοδιασμό και την αποθήκευση αμμωνίας και μεθανόλης στη Βόρεια Ευρώπη [13]

4. Κυψέλες καυσίμου

4.1 Ορισμός

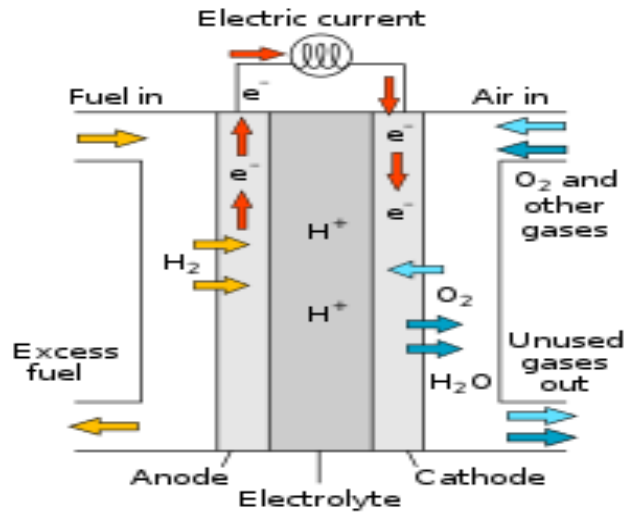
Οι κυψέλες καυσίμου (FC - fuel cells) είναι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική δυναμική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην κυψέλη καυσίμου πραγματοποιείται μια χημική αντίδραση αλλά δεν υπάρχει καύσιμο – η κυψέλη καυσίμου είναι ένα μέσο μετατροπής ενέργειας. Έχουν διάφορες χρήσεις, που κυμαίνονται από μεγάλα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έως μικρότερες εφαρμογές όπως η τροφοδοσία ηλεκτρικών οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των αυτοκινήτων, των φορτηγών και των λεωφορείων.

Μια κυψέλη καυσίμου λειτουργεί παρόμοια με μια μπαταρία. Ωστόσο, μια κυψέλη καυσίμου συνεχίζει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όσο υπάρχει παροχή καυσίμου και οξυγόνου, σε αντίθεση με μια μπαταρία, η οποία εξαντλείται και πρέπει να επαναφορτιστεί. Οι πιο συνηθισμένες μορφές καυσίμου είναι το υδρογόνο και τα καύσιμα υδρογονανθράκων, όπως το φυσικό αέριο, η μεθανόλη και το ντίζελ. Το οξυγόνο προέρχεται συνήθως από τον αέρα.

Η διεργασία μιας κυψέλης καυσίμου αφορά δύο χημικές αντιδράσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 26. Στην άνοδο ή στην αρνητική πλευρά της κυψέλης, το μόριο του καυσίμου (για παράδειγμα του υδρογόνου) διασπάται σε θετικά ιόντα και ηλεκτρόνια. Τα ιόντα κινούνται μέσω ενός ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο ή τη θετική πλευρά της κυψέλης, ενώ τα ηλεκτρόνια αναγκάζονται να διανύσουν μεγαλύτερη διαδρομή μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, δημιουργώντας μια ροή ηλεκτρισμού.

Στην κάθοδο, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια συνδυάζονται με το οξυγόνο για να παράγουν νερό, το οποίο αποβάλλεται από την κυψέλη, και θερμότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, με το νερό και τη θερμότητα να είναι τα μόνα παραπροϊόντα. Αυτό καθιστά τις κυψέλες καυσίμου μια πολύ καθαρή πηγή ενέργειας, χωρίς επιβλαβείς εκπομπές, εάν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο.

Στην πράξη, ωστόσο, οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν συχνά άλλα καύσιμα, τα οποία μπορεί να παράγουν εκπομπές. Τα καύσιμα υδρογονανθράκων, για παράδειγμα, όταν καίγονται παράγουν διοξείδιο του άνθρακα. Η μεθανόλη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε ορισμένους τύπους κυψελών καυσίμου, αλλά η οξείδωσή της παράγει επίσης διοξείδιο του άνθρακα [50].



Εικόνα 25: Λειτουργία κυψέλης καυσίμου [51]

Η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος του καυσίμου, ο σχεδιασμός της κυψέλης, ο τύπος του ηλεκτρολύτη και οι συνθήκες λειτουργίας. Σε γενικές γραμμές, οι κυψέλες καυσίμου είναι πιο αποδοτικές από τις μηχανές εσωτερικής καύσης και μπορούν να είναι πολύ αποδοτικές εάν η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς, όπως θέρμανση ή ψύξη.

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Είναι αθόρυβες, καθώς δεν έχουν κινούμενα μέρη, και είναι πολύ αξιόπιστες. Το μέγεθός τους μπορεί να διαφοροποιηθεί για να ταιριάζει σε διαφορετικές εφαρμογές και μπορούν να στοιβάζονται για να παράγουν περισσότερη ισχύ. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, εφόσον διαθέτουν συνεχή παροχή καυσίμου και οξυγόνου.

Ωστόσο, η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει κάποιες προκλήσεις. Οι κυψέλες εξακολουθούν να είναι σχετικά ακριβές, ιδίως για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Το κόστος του καυσίμου, ιδίως του υδρογόνου, μπορεί να είναι υψηλό. Και η υποδομή για την παράδοση και την αποθήκευση του καυσίμου δεν είναι ακόμη καλά ανεπτυγμένη, ειδικά για το υδρογόνο.

Παρά τις προκλήσεις αυτές, οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για το μέλλον, ιδίως σε εφαρμογές όπου είναι σημαντικές οι χαμηλές εκπομπές και η υψηλή απόδοση. Χρησιμοποιούνται ήδη σε ορισμένα ηλεκτρικά οχήματα και δοκιμάζονται σε άλλες εφαρμογές, όπως η σταθερή παραγωγή ενέργειας και η χρήση στις θαλάσσιες μεταφορές.

Η χρήση των κυψελών καυσίμου στα πλοία είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Τα πλοία έχουν μεγάλες απαιτήσεις ισχύος και υπόκεινται όλο και περισσότερο σε κανονισμούς εκπομπών. Οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να παρέχουν μια καθαρή και αποδοτική πηγή ενέργειας, χρησιμοποιώντας καύσιμα όπως το φυσικό αέριο ή η μεθανόλη που είναι άμεσα διαθέσιμα και σχετικά φθηνά. Το υδρογόνο θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί, αν ξεπεραστούν οι προκλήσεις της αποθήκευσης και της παράδοσης.

Η έρευνα και η ανάπτυξη συνεχίζονται για τη βελτίωση των επιδόσεων και τη μείωση του κόστους των κυψελών καυσίμου, καθώς και για την ανάπτυξη καλύτερων τρόπων παραγωγής, παροχής και αποθήκευσης των καυσίμων που χρησιμοποιούν. Πρόκειται για έναν ταχέως εξελισσόμενο τομέα και το μέλλον των κυψελών καυσίμου φαίνεται πολλά υποσχόμενο.

Συνοψίζοντας, οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, χρησιμοποιούν μια ποικιλία καυσίμων και παράγουν πολύ λίγες εκπομπές. Έχουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς και κάποιες προκλήσεις, ενώ η χρήση τους ερευνάται και αναπτύσσεται για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων μεταφορών. Η χρήση τους θα μπορούσε να βοηθήσει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και να συμβάλει σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

4.1.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Τόσο οι νηογνώμονες όσο και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ) έχουν αρχίσει να ασχολούνται με την ενσωμάτωση των κυψελών καυσίμου σε ναυτιλιακές εφαρμογές λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος για αυτή την τεχνολογία στη ναυτιλία.

ΙΜΟ: Ο ΙΜΟ έχει αναπτύξει κατευθυντήριες γραμμές στο πλαίσιο του Διεθνούς Κώδικα Ασφαλείας για πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης (IGF Code). Ο Κώδικας IGF υιοθετήθηκε για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου για τα πλοία, τα πληρώματά τους και το περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των σχετικών καυσίμων. Αν και ο Κώδικας IGF επικεντρώνεται κυρίως στο ΥΦΑ ως καύσιμο, έχει διατάξεις που μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης, συμπεριλαμβανομένων των κυψελών καυσίμου. Καθώς η τεχνολογία κυψελών καυσίμου ωριμάζει και η υιοθέτησή της στον ναυτιλιακό τομέα αυξάνεται, αναμένεται ότι ο ΙΜΟ θα αναπτύξει πιο συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές και κανονισμούς που αφορούν τις κυψέλες καυσίμου.

Νηογνώμονες: Διάφοροι νηογνώμονες έχουν λάβει προληπτικά μέτρα για τη θέσπιση κατευθυντήριων γραμμών και κανόνων για την εφαρμογή κυψελών καυσίμου σε πλοία. Για παράδειγμα:

- **DNV GL:** Ο DNV GL, ένας από τους κορυφαίους νηογνώμονες πλοίων στον κόσμο, έχει εκδώσει κανόνες και κατευθυντήριες γραμμές που αφορούν την ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου σε ναυτιλιακές εφαρμογές. Καλύπτουν πτυχές όπως ο σχεδιασμός, η εγκατάσταση και τα μέτρα ασφαλείας που πρέπει να ληφθούν υπόψη.
- **ABS:** Ο ABS έχει επίσης δημοσιεύσει κατευθυντήριες γραμμές που αφορούν ειδικά τις εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμου σε θαλάσσιες και υπεράκτιες κατασκευές. Παρέχουν κριτήρια για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και την εγκατάσταση συστημάτων κυψελών καυσίμου.
- **Lloyd's Register:** Ομοίως, ο Lloyd's Register έχει αναπτύξει οδηγίες σχετικά με τη χρήση κυψελών καυσίμου στη ναυτιλία, εστιάζοντας στην ασφάλεια, την εγκατάσταση και τη λειτουργία.

4.2 Αρχή λειτουργίας

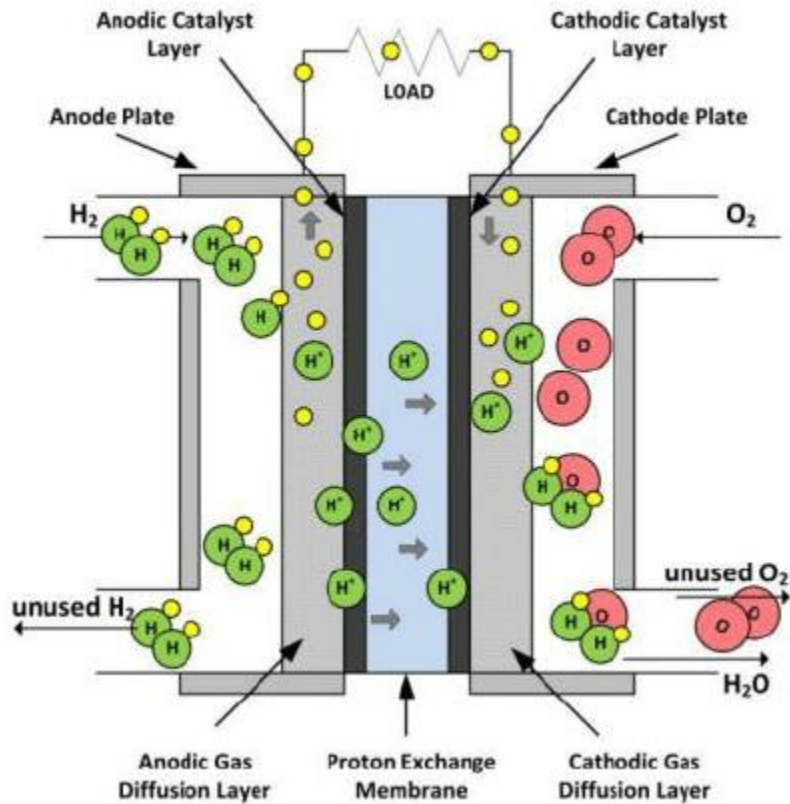
Οι κυψέλες καυσίμου αντιπροσωπεύουν μια σημαντική ευκαιρία για τη μετάβαση προς ένα πιο βιώσιμο μέλλον με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πρόκειται για συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια που περιέχεται σε διάφορα καύσιμα σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μια ηλεκτροχημικής αντίδρασης, παρόμοια με τη λειτουργία μιας μπαταρίας. Η διαφορά, ωστόσο, είναι ότι, ενώ μια μπαταρία εξαντλεί τελικά το εσωτερικό ενεργειακό της απόθεμα και πρέπει να επαναφορτιστεί, μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια εφόσον παρέχεται καύσιμο και οξειδωτικό μέσο (συνήθως αέρας).

Αυτή η παράγραφος εμβαθύνει στη λεπτομερή λειτουργία των κυψελών καυσίμου, ιδίως εκείνων που χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο. Θα επικεντρωθούμε στις κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM - polymer electrolyte membrane ή proton exchange membrane), τον πιο συνηθισμένο τύπο που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα και για σταθερή παραγωγή ενέργειας.

4.2.1 Κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων

Οι κυψέλες καυσίμου PEM αποτελούνται από τέσσερα βασικά στοιχεία: μια άνοδο, μια κάθοδο, έναν ηλεκτρολύτη (τη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων) και έναν καταλύτη (εικόνα 26). Τα εν λόγω εξαρτήματα τυπικά παρεμβάλλονται μεταξύ δύο πλακών που διανέμουν τα καύσιμα και μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα [52].

Άνοδος: Το αέριο υδρογόνο (H_2) εισέρχεται στην κυψέλη καυσίμου από την πλευρά της ανόδου. Όταν τα μόρια υδρογόνου έρχονται σε επαφή με τον καταλύτη λευκόχρυσου στην άνοδο, διασπώνται σε ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια) και ηλεκτρόνια. Αυτό ονομάζεται αντίδραση οξείδωσης.



Εικόνα 26: Σχηματική αναπαράσταση κυψέλης καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων [51]

Ηλεκτρολύτης (μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων): Η PEM, συνήθως κατασκευασμένη από ένα υλικό που ονομάζεται Nafion, επιτρέπει τη διέλευση μόνο των θετικά φορτισμένων ιόντων υδρογόνου (πρωτονίων) προς την πλευρά της καθόδου της κυψέλης καυσίμου. Τα ηλεκτρόνια εμποδίζονται, και αναγκάζονται να ταξιδέψουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος για να φτάσουν στην άλλη πλευρά της κυψέλης καυσίμου, δημιουργώντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα.

Κάθοδος: Στην πλευρά της καθόδου, το οξυγόνο (από τον αέρα) εισάγεται στην κυψέλη καυσίμου. Τα μόρια του οξυγόνου αντιδρούν με τα πρωτόνια που έχουν ταξιδέψει μέσω της μεμβράνης και τα ηλεκτρόνια που έχουν ταξιδέψει μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, σχηματίζοντας νερό - το μοναδικό παραπροϊόν μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται αντίδραση αναγωγής. Ο σχηματισμός του νερού λαμβάνει χώρα στην κάθοδο και αποβάλλεται από την κυψέλη, συχνά με τη μορφή υδρατμών.

Καταλύτης: Ένας καταλύτης, συνήθως κατασκευασμένος από λευκόχρυσο, είναι απαραίτητος για την επιτάχυνση των αντιδράσεων στην άνοδο και την κάθοδο. Στην άνοδο, ο καταλύτης διευκολύνει τη διάσπαση του μορίου του υδρογόνου, ενώ στην κάθοδο διευκολύνει το συνδυασμό ιόντων υδρογόνου, ηλεκτρονίων και οξυγόνου για το σχηματισμό νερού.

Συνοπτικά, το καύσιμο υδρογόνο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια διασπώντας το υδρογόνο σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια στην άνοδο (εικόνα 26), μεταφέροντας τα πρωτόνια μέσω του PEM στην κάθοδο, αναγκάζοντας τα ηλεκτρόνια να ταξιδέψουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος (παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα) και τέλος συνδυάζοντας τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο στην κάθοδο για να σχηματίσουν νερό.

4.2.2 Ο "κινητήρας" ενός συστήματος κυψελών καυσίμου

Ενώ η βασική αρχή μιας κυψέλης καυσίμου είναι απλή, ένα ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου ή "κινητήρας" είναι πιο πολύπλοκο. Αποτελείται όχι μόνο από τη στοίβα της κυψέλης καυσίμου, όπου λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, αλλά και από διάφορα άλλα υποσυστήματα (εικόνα 28) που διαχειρίζονται το καύσιμο, τον αέρα, το νερό και τη θερμότητα, και ελέγχουν την ηλεκτρική έξοδο [52].

Ακολουθούν τα βασικά υποσυστήματα:

Σύστημα διαχείρισης καυσίμου: Αυτό το σύστημα ελέγχει την παροχή υδρογόνου στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου. Πρέπει να διασφαλίζει μια σταθερή ροή υδρογόνου, ακόμη και όταν η ζήτηση ενέργειας μεταβάλλεται. Πρέπει επίσης να διαχειρίζεται την ασφαλή αποθήκευση του υδρογόνου, η οποία μπορεί να αποτελέσει πρόκληση λόγω της μεγάλης ευφλεκτότητάς του, όπως επίσης την αποθήκευση υπό υψηλή πίεση ή την κρυογονική αποθήκευση.

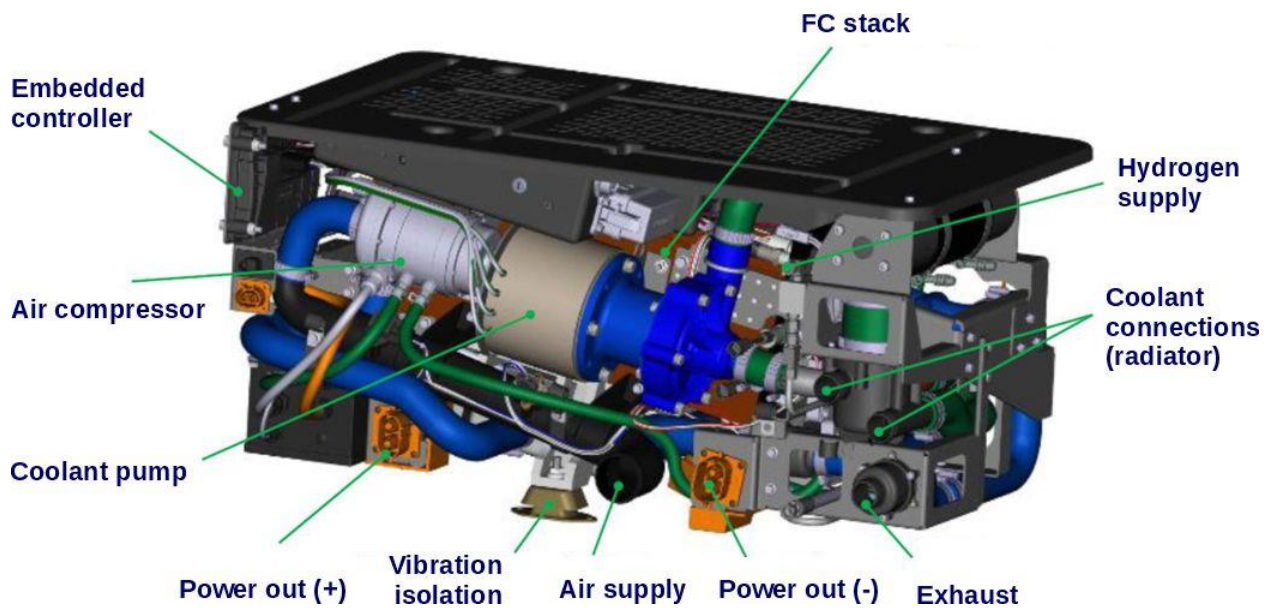
Σύστημα διαχείρισης αέρα: Αυτό το σύστημα παρέχει το οξυγόνο που είναι απαραίτητο για την αντίδραση στην κάθοδο. Σε μια κυψέλη καυσίμου PEM, αυτό περιλαμβάνει συνήθως έναν συμπιεστή που λαμβάνει αέρα από το περιβάλλον και τον συμπιέζει πριν τον τροφοδοτήσει στην κάθοδο.

Σύστημα ψύξης: Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν θερμότητα, η οποία πρέπει να διαχειρίζεται σωστά για την αποφυγή ζημιών στις κυψέλες και τη διασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας τους. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με ένα σύστημα ψύξης, παρόμοιο με το ψυγείο ενός αυτοκινήτου, το οποίο χρησιμοποιεί ένα ψυκτικό υγρό για να απορροφήσει τη θερμότητα και να τη διοχετεύσει στο περιβάλλον.

Σύστημα διαχείρισης νερού: Στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου παράγεται νερό, το οποίο πρέπει να απομακρύνεται για να αποφευχθεί η πλημμύρα της κυψέλης. Ταυτόχρονα, η κυψέλη PEM πρέπει να διατηρείται υγρή για να λειτουργεί αποτελεσματικά. Η ισορροπία αυτή επιτυγχάνεται με το σύστημα διαχείρισης νερού, συχνά με τη βοήθεια του συστήματος ψύξης.

Ηλεκτρονικά ισχύος: Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από μια κυψέλη καυσίμου είναι DC (συνεχές ρεύμα), αλλά πολλές εφαρμογές απαιτούν AC (εναλλασσόμενο ρεύμα). Επιπλέον, η τάση που παράγεται από μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο. Τα ηλεκτρονικά ισχύος μετατρέπουν την παραγωγή συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα και ρυθμίζουν την τάση ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του φορτίου.

Η λειτουργία ενός συστήματος κυψελών καυσίμου περιλαμβάνει μια λεπτή ισορροπία χημικών αντιδράσεων, ροής ρευστών, διαχείρισης θερμότητας και ηλεκτρικού ελέγχου. Ενώ η αρχή λειτουργίας είναι απλή - μετατροπή υδρογόνου και οξυγόνου σε ηλεκτρική ενέργεια και νερό - η πρακτική εφαρμογή απαιτεί μια εξελιγμένη και προσεκτική μηχανική διαχείριση. Ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι μια καθαρή, αποδοτική και αξιόπιστη πηγή ενέργειας που μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε ένα βιώσιμο μέλλον με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 27: Εξαρτήματα συστήματος κυψελών καυσίμου [53]

4.3 Υιοθέτηση τεχνολογίας κυψελών καυσίμου

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου, ιδίως εκείνων που χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο, προϋποθέτει την προσεκτική εξέταση διαφόρων τεχνικών ζητημάτων. Οι προκλήσεις αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε γενικές γραμμές σε θέματα εγκατάστασης του συστήματος και σε θέματα λειτουργικής ασφάλειας.

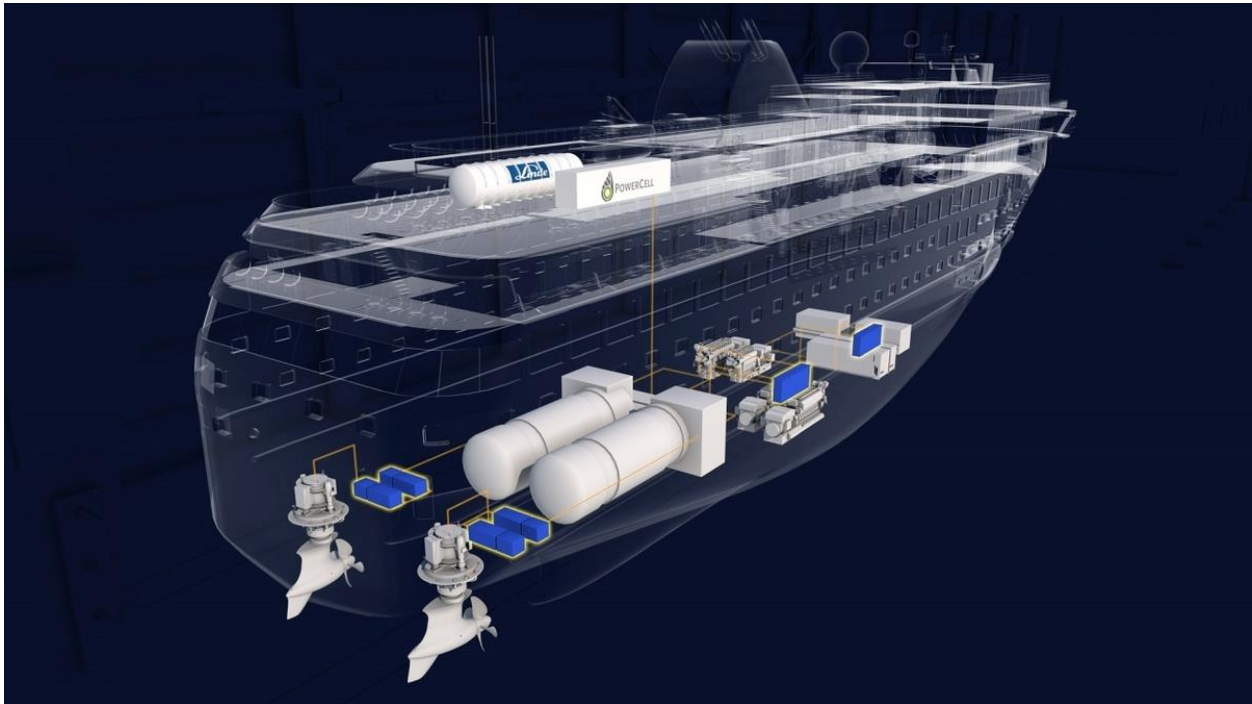
4.3.1 Εγκατάσταση συστήματος

Αποθήκευση καυσίμου: Οι φυσικές ιδιότητες του υδρογόνου δημιουργούν προκλήσεις για την αποθήκευση. Για να χρησιμοποιηθεί σε μια κυψέλη καυσίμου, το υδρογόνο πρέπει να αποθηκεύεται στη στοιχειακή του μορφή (H_2). Το H_2 είναι ένα αέριο χαμηλής πυκνότητας υπό κανονικές συνθήκες και η αποθήκευσή του απαιτεί τη χρήση δεξαμενών υψηλής πίεσης ή κρυογονικής αποθήκευσης, οι οποίες θέτουν τεχνικές προκλήσεις. Οι δεξαμενές υψηλής πίεσης μπορεί να είναι ογκώδεις και απαιτούν στιβαρή κατασκευή για την αποφυγή θραύσης, ενώ η κρυογονική αποθήκευση απαιτεί πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ($-253^\circ C$), γεγονός που εισάγει ζητήματα θερμικής διαχείρισης. Η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για την ανάπτυξη εναλλακτικών τεχνολογιών αποθήκευσης, όπως η αποθήκευση υδρογόνου σε στερεά κατάσταση, όπου το υδρογόνο απορροφάται από ένα υδρίδιο μετάλλου ή παρόμοιο υλικό, μειώνοντας ενδεχομένως τις απαιτήσεις πίεσης ή θερμοκρασίας.

Στοιίβα κυψελών καυσίμου: Η συναρμολόγηση κυψελών ονομάζεται στοιίβα κυψελών καυσίμου ή απλώς στοιίβα. Η αύξηση του αριθμού των κυψελών σε μια στοιίβα αυξάνει την τάση, ενώ η αύξηση της επιφάνειας των κυψελών αυξάνει την ένταση του ρεύματος. Η στοιίβα κυψελών καυσίμου πρέπει να συνδεθεί με την παροχή υδρογόνου, την παροχή αέρα και το σύστημα ψύξης. Επιπλέον, η ηλεκτρική έξοδος πρέπει να ενσωματωθεί με τα ηλεκτρονικά ισχύος για τη μετατροπή και την προετοιμασία της ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς κινητήρες εσωτερικής καύσης, γεγονός που απαιτεί σημαντικές αλλαγές στη διάταξη και τον σχεδιασμό, ιδίως στην περίπτωση μετασκευών.

Ηλεκτρονικά ισχύος: Τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος μετατρέπουν τη συνεχή έξοδο της κυψέλης καυσίμου σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ρυθμίζουν την τάση και διαχειρίζονται την παροχή ισχύος στο φορτίο. Τα συστήματα αυτά πρέπει να σχεδιάζονται για να διαχειρίζονται το επίπεδο ισχύος και την τάση της κυψέλης καυσίμου και πρέπει να ενσωματώνονται στα συστήματα ελέγχου της εγκατάστασης. Παράγουν επίσης θερμότητα και πρέπει να ψύχονται για να λειτουργούν αποτελεσματικά.

Τοποθέτηση συστήματος κυψελών καυσίμου: Τα συστήματα κυψελών καυσίμου στα πλοία μπορούν να τοποθετηθούν σε διάφορες περιοχές ανάλογα με το σχεδιασμό του πλοίου, τον τύπο της κυψέλης καυσίμου και τις απαιτήσεις ασφαλείας (εικόνα 28). Συχνά, στεγάζονται στο μηχανοστάσιο ή σε ειδικά διαμερίσματα, ιδίως εάν συμπληρώνουν ή αντικαθιστούν τα παραδοσιακά συστήματα πρόωσης. Η αποθήκευση υδρογόνου για τις κυψέλες καυσίμου μπορεί να τοποθετείται κάτω από το κατάστρωμα για λόγους προστασίας και ασφάλειας, ενώ οι εξαεριστήρες από ορισμένες κυψέλες καυσίμου μπορεί να βρίσκονται στο κατάστρωμα. Δεδομένων των μοναδικών ιδιοτήτων και κινδύνων του υδρογόνου, μπορεί να δημιουργηθούν εξειδικευμένα διαμερίσματα με ενισχυμένους μηχανισμούς ασφαλείας και εξαερισμού. Η συγκεκριμένη θέση μπορεί να ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την τεχνολογία και το σχεδιασμό του πλοίου.



Εικόνα 28: Τοποθέτηση συστήματος Fuel Cells υδρογόνου υψηλής χωρητικότητας στο πλοίο Riviera [54]

4.3.2 Θέματα επιχειρησιακής ασφάλειας

Χειρισμός καυσίμων: Το υδρογόνο είναι μια εξαιρετικά εύφλεκτη ουσία. Μπορεί να αναφλεγεί από σπινθήρα, θερμότητα ή ακόμη και από το φως του ήλιου και οι φλόγες του είναι σχεδόν αόρατες. Συνεπώς, ο χειρισμός του υδρογόνου απαιτεί προσεκτικά μέτρα ασφαλείας. Αυτά περιλαμβάνουν

αισθητήρες για την ανίχνευση διαρροών, συστήματα εξαερισμού για την αποτροπή της συσσώρευσης υδρογόνου και διαδικασίες ασφαλείας για το χειρισμό και τη συντήρηση.

Λειτουργία κυψελών καυσίμου: Η λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνει τη διαχείριση της θερμότητας, του νερού και των δυνητικά επικίνδυνων υλικών (όπως ο ηλεκτρολύτης σε ορισμένους τύπους κυψελών καυσίμου). Τα μέτρα ασφαλείας είναι απαραίτητα για τη διαχείριση αυτών των κινδύνων. Αυτά περιλαμβάνουν συστήματα ψύξης, συστήματα διαχείρισης νερού και συστήματα περιορισμού του ηλεκτρολύτη.

Έλεγχος και διαχείριση του συστήματος: Ένα σύστημα κυψελών καυσίμου απαιτεί εξελιγμένα συστήματα ελέγχου για τη διαχείριση της παροχής καυσίμου και αέρα, της ψύξης και της διαχείρισης του νερού και της ηλεκτρικής εξόδου. Αυτά τα συστήματα ελέγχου πρέπει να χειρίζονται την κανονική λειτουργία αλλά και τη λειτουργία ή διακοπή σε συνθήκες σφάλματος. Πρέπει επίσης να επικοινωνούν με τον χρήστη και με τυχόν συστήματα ελέγχου ανώτερου επιπέδου (όπως το σύστημα διαχείρισης ενός οχήματος ή ενός πλοίου).

Χειρισμός έκτακτης ανάγκης: Σε περίπτωση ατυχήματος ή δυσλειτουργίας, τα μέτρα ασφαλείας είναι απαραίτητα για την αποτροπή μιας επικίνδυνης κατάστασης. Αυτό περιλαμβάνει συστήματα διακοπής έκτακτης ανάγκης για την παροχή υδρογόνου, συστήματα πυρόσβεσης και διαδικασίες ασφαλείας για τους χρήστες (για παράδειγμα τους επιβάτες οχήματος ή το πλήρωμα πλοίου).

4.4 Ανεφοδιασμός των πλοίων

Ο ανεφοδιασμός των πλοίων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου είναι μια διαδικασία που διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης καυσίμου και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Οι δύο πιο συνηθισμένοι τύποι καυσίμου για τις κυψέλες καυσίμου σε θαλάσσιες εφαρμογές είναι το υδρογόνο και η μεθανόλη, με τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου να είναι οι πιο συχνά συζητούμενες λόγω της υψηλής απόδοσης και της δυνατότητας μηδενικών εκπομπών. Ο ανεφοδιασμός των πλοίων που κινούνται με κυψέλες καυσίμου περιλαμβάνει μια σειρά από βήματα που πρέπει να εκτελούνται προσεκτικά ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η αποτελεσματικότητα.

1. Προετοιμασία για τον ανεφοδιασμό με καύσιμα:

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία ανεφοδιασμού με καύσιμα είναι η προετοιμασία. Αυτή περιέχει διάφορα στοιχεία, από την καθιέρωση αποτελεσματικών διαύλων επικοινωνίας μεταξύ του πλοίου, του σταθμού

ανεφοδιασμού και των λιμενικών αρχών έως τη διενέργεια ενδεδειγμένης επιθεώρησης ασφαλείας όλων των συστημάτων που εμπλέκονται στη διαδικασία ανεφοδιασμού.

Στην περίπτωση του υδρογόνου, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα μοναδικά χαρακτηριστικά αυτού του καυσίμου. Το υδρογόνο είναι άχρωμο και άοσμο, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανίχνευση διαρροών χωρίς εξειδικευμένους αισθητήρες. Έχει επίσης μεγάλο εύρος ευφλεκτότητας και μπορεί να προκαλέσει ευθραυστότητα σε ορισμένα μέταλλα, απαιτώντας έτσι εξειδικευμένο εξοπλισμό αποθήκευσης και μεταφοράς. Η μεθανόλη, από την άλλη πλευρά, είναι υγρό σε θερμοκρασία δωματίου και χειρίζεται ευκολότερα, αλλά είναι τοξική και εύφλεκτη, οπότε πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις για την αποφυγή διαρροών και να εξασφαλίζεται ο κατάλληλος εξαερισμός κατά τον ανεφοδιασμό με καύσιμα.

2. Σύνδεση του εξοπλισμού ανεφοδιασμού καυσίμου:

Η σύνδεση του εξοπλισμού ανεφοδιασμού καυσίμου περιλαμβάνει τη σύνδεση του συστήματος παροχής καυσίμων από το σταθμό ανεφοδιασμού με το σύστημα αποθήκευσης καυσίμων του πλοίου. Το υδρογόνο συνδέεται μέσω μιας γραμμής αερίου υψηλής πίεσης, ενώ για την μεθανόλη χρησιμοποιείται ένα σύστημα αντλίας για τη μεταφορά του καυσίμου. Κατά τη διάρκεια αυτού του βήματος πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εξασφαλίζεται στεγανοποίηση στα σημεία σύνδεσης προς αποφυγή διαρροών.

3. Διαδικασία μεταφοράς του καυσίμου:

Το επόμενο βήμα είναι η μεταφορά του καυσίμου από τον σταθμό ανεφοδιασμού καυσίμων στο πλοίο. Ο ρυθμός μεταφοράς παρακολουθείται προσεκτικά για να αποφευχθεί η υπερπλήρωση ή η ταχεία μεταβολή της πίεσης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε προβλήματα ασφάλειας.

Στην περίπτωση του υδρογόνου, το καύσιμο παραδίδεται είτε ως συμπιεσμένο αέριο είτε ως κρυογονικό υγρό. Το συμπιεσμένο αέριο είναι ευκολότερο στη διαχείριση και απαιτεί λιγότερο πολύπλοκη υποδομή, αλλά χρειάζεται μεγάλες, βαριές δεξαμενές λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας. Το κρυογονικό υγρό υδρογόνο έχει πολύ υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, αλλά απαιτεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες χειρισμού λόγω της εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας του.

Η μεταφορά καυσίμου μεθανόλης είναι κάπως απλούστερη, καθώς μπορεί να αντληθεί όπως τα παραδοσιακά υγρά καύσιμα. Ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή διαρροών και να διασφαλίζεται ότι το καύσιμο δεν μολύνεται κατά τη μεταφορά.

4. Αποσύνδεση και έλεγχοι μετά τον ανεφοδιασμό:

Μόλις ολοκληρωθεί η μεταφορά καυσίμου, ο εξοπλισμός ανεφοδιασμού μπορεί να αποσυνδεθεί. Τυχόν διατάξεις ασφαλείας ή προφυλάξεις που λήφθηκαν κατά τη διαδικασία τροφοδοσίας καυσίμου μπορούν τώρα να αφαιρεθούν. Επίσης θα πρέπει να διενεργηθούν έλεγχοι μετά τον ανεφοδιασμό με καύσιμο για να διασφαλιστεί ότι το καύσιμο έχει φορτωθεί σωστά και ότι το σύστημα κυψέλης καυσίμου λειτουργεί σωστά. Στη περίπτωση του υδρογόνου, θα πρέπει να γίνονται έλεγχοι για πιθανές διαρροές με τη χρήση ειδικών αισθητήρων υδρογόνου.

5. Τεκμήρια:

Όπως και στον παραδοσιακό ανεφοδιασμό καυσίμων, η τεκμηρίωση διαδραματίζει βασικό ρόλο στον ανεφοδιασμό πλοίων με κυψέλες καυσίμου. Θα πρέπει να καταγράφονται η ποσότητα καυσίμου που παρέχεται, η ώρα και η ημερομηνία του ανεφοδιασμού, τυχόν περιστατικά ή προβλήματα κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού και άλλες σχετικές λεπτομέρειες, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση ακριβών αρχείων κατανάλωσης καυσίμου και μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση τυχόν μελλοντικών προβλημάτων με το σύστημα κυψελών καυσίμου.

6. Έλεγχοι λειτουργίας:

Τέλος, θα πρέπει να διενεργούνται λειτουργικοί έλεγχοι για να διασφαλιστεί ότι το σύστημα κυψελών καυσίμου λειτουργεί σωστά μετά τον ανεφοδιασμό. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την εκκίνηση του συστήματος και τον έλεγχο των παραμέτρων απόδοσης, τη διενέργεια δοκιμών διαρροής ή την εκτέλεση διαγνωστικών δοκιμών στη στοίβα κυψελών καυσίμου.

Ο ανεφοδιασμός πλοίων με κυψέλες καυσίμου είναι μια πιο σύνθετη διαδικασία σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών των καυσίμων όπως το υδρογόνο και η μεθανόλη. Ωστόσο, με προσεκτική προετοιμασία, αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων μερών, η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Καθώς η τεχνολογία κυψελών καυσίμου συνεχίζει να εξελίσσεται και να κερδίζει την αποδοχή της στη ναυτιλιακή βιομηχανία, αναμένονται περαιτέρω εξελίξεις και τυποποίηση στη διαδικασία ανεφοδιασμού, όπως ειδικές εγκαταστάσεις και ολοκληρωμένοι (integrated) σταθμοί ανεφοδιασμού στα λιμάνια (εικόνα 29).



Geno Hydrogen Refuelling Stations for Large Fleets

Εικόνα 29: Σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου για πλοία [55]

4.5 Παραδείγματα πλοίων με Fuel Cells

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου βρίσκεται εδώ και καιρό στο επίκεντρο της έρευνας στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Η χρήση κυψελών καυσίμου σε ναυτιλιακές εφαρμογές κερδίζει συνεχώς έδαφος, ιδίως καθώς ο κλάδος προσπαθεί να επιτύχει αυστηρότερους στόχους εκπομπών. Ακολουθούν παραδείγματα πλοίων που λειτουργούν ή σχεδιάζεται να λειτουργήσουν με κυψέλες καυσίμου:

1. **Energy Observer:** Το Energy Observer είναι ένα πρώην αγωνιστικό καταμαράν που μετατράπηκε σε ένα αυτόνομο σκάφος χωρίς εκπομπές ρύπων. Αυτό το πειραματικό πλοίο τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ένα σύστημα που παράγει υδρογόνο από θαλασσινό νερό. Το υδρογόνο αποθηκεύεται επί του σκάφους και στη συνέχεια χρησιμοποιείται στις κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν χρειάζεται (εικόνα 30) [56].

2. **Viking Lady:** Το Viking Lady, ένα νορβηγικό πλοίο εφοδιασμού τύπου πλατφόρμας, αποτελεί την πρώτη εφαρμογή της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου στη ναυτιλία. Στο πλαίσιο ενός έργου που ξεκίνησε το 2003 εγκαταστάθηκε στο Viking Lady ένα σύστημα κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) ισχύος

320 kW. Η κυψέλη καυσίμου, η οποία τροφοδοτήθηκε με υγροποιημένο φυσικό αέριο, χρησιμοποιήθηκε για την παροχή βοηθητικής ενέργειας στο πλοίο (εικόνα 31) [57].

3. **HYSEAS III:** Στο πλαίσιο του έργου HYSEAS III στην Ευρώπη, υπάρχουν σχέδια για το σχεδιασμό και κατασκευή του πρώτου θαλάσσιου οχηματαγωγού πλοίου αυτοκινήτων και επιβατών στον κόσμο που θα κινείται με υδρογόνο. Το υδρογόνο που θα χρησιμοποιείται θα παράγεται από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια σηματοδοτώντας την αρχή στην υιοθέτηση του υδρογόνου ως καυσίμου για επιβατικά πλοία [58].

4. **Nemo H2:** Το Nemo H2 αναμένεται να είναι το πρώτο ρυμουλκό πλοίο με κινητήρα υδρογόνου στον κόσμο. Το λιμάνι της Αμβέρσας στο Βέλγιο ανακοίνωσε το έργο σε συνεργασία με την εταιρεία Compagnie Maritime Belge (CMB). Το υδρογόνο που χρησιμοποιείται στο πλοίο θα παράγεται με πράσινες μεθόδους, διασφαλίζοντας ότι η λειτουργία του ρυμουλκού θα είναι εντελώς απαλλαγμένη από άνθρακα [59].

5. **MS Sjövägen:** Το MS Sjövägen, ένα επιβατηγό οχηματαγωγό πλοίο, αποτελεί αντικείμενο του έργου Maranda στη Σουηδία. Το έργο προβλέπει την αντικατάσταση των γεννητριών ντίζελ με τεχνολογία κυψελών καυσίμου υδρογόνου, υποστηρίζοντας τις βιώσιμες και απαλλαγμένες από εκπομπές θαλάσσιες μεταφορές [60].

6. **AIDAnova:** Αν και δεν τροφοδοτείται εξ ολοκλήρου με κυψέλες καυσίμου, το AIDAnova, ένα κρουαζιερόπλοιο που κατασκευάστηκε από τη Meyer Werft για την AIDA Cruises, είναι το πρώτο κρουαζιερόπλοιο στον κόσμο που τροφοδοτείται στη θάλασσα και στο λιμάνι με υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) χαμηλών εκπομπών. Το πλοίο σχεδιάζει επίσης να ενσωματώσει τεχνολογία κυψελών καυσίμου [61].



Εικόνα 30: Το αγωνιστικό καταμαράν Energy Observer



Εικόνα 31: Το πλοίο VIKING LADY (Offshore Supply Ship) νηολογημένο στη Νορβηγία

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα προαναφερθέντα έργα διαφέρουν ως προς την προσέγγιση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου, καθώς ορισμένα χρησιμοποιούν απευθείας υδρογόνο, ενώ άλλα χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους καυσίμων. Παρ' όλα αυτά, καθένα από αυτά τα έργα αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς ένα καθαρότερο, πιο βιώσιμο μέλλον για τη ναυτιλιακή βιομηχανία [62].

5. Υγροποιημένο φυσικό αέριο

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο ΥΦΑ (LNG - Liquefied Natural Gas) έχει κερδίσει την αποδοχή της ναυτιλιακής κοινότητας την τελευταία δεκαετία ως ναυτιλιακό καύσιμο. Με την αυξανόμενη πίεση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τους αυστηρούς ναυτιλιακούς κανονισμούς, το ΥΦΑ έχει αναδειχθεί ως μια βιώσιμη επιλογή για τους πλοιοκτήτες και τους φορείς εκμετάλλευσης. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, το ΥΦΑ μειώνει σημαντικά τις εκπομπές, ανοίγοντας το δρόμο για μια καθαρότερη, πιο βιώσιμη ναυτιλιακή βιομηχανία [63, 64].

5.1 Νομοθεσία και κανονισμοί

Αρκετοί διεθνείς νομοθετικοί κανονισμοί ρυθμίζουν τη χρήση του ΥΦΑ στη ναυτιλία. Αυτοί έχουν θεσπιστεί κυρίως από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), που είναι υπεύθυνος για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της προστασίας της ναυσιπλοΐας και την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης.

Η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL) είναι η κύρια διεθνής σύμβαση που αφορά την πρόληψη της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος από πλοία εξ αιτίας λειτουργικών ή τυχαίων αιτιών. Το παράρτημα VI της MARPOL αναφέρεται στην ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία και περιλαμβάνει διατάξεις για τη μείωση των εκπομπών SO_x και NO_x, οι οποίες μειώνονται σημαντικά όταν χρησιμοποιείται ΥΦΑ ως καύσιμο.

Ο Διεθνής Κώδικας Ασφαλείας για πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης (IGF Code) εγκρίθηκε από τον IMO το 2015 για να καθορίσει υποχρεωτικές διατάξεις για την εγκατάσταση, τον έλεγχο και την παρακολούθηση των μηχανημάτων, του εξοπλισμού και των συστημάτων που χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης όπως το ΥΦΑ. Στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου για το πλοίο, το πλήρωμά του και το περιβάλλον.

Επιπλέον, η αρχική στρατηγική του IMO για τα αέρια του θερμοκηπίου αποσκοπεί στη μείωση των συνολικών ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050 σε σύγκριση με το 2008, ενώ παράλληλα συνεχίζονται οι προσπάθειες για τη σταδιακή εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το συντομότερο δυνατόν αυτόν τον αιώνα. Η χρήση του ΥΦΑ μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη αυτού του στόχου λόγω των χαμηλότερων εκπομπών CO₂ σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα.

Το ΥΦΑ ως καύσιμο υπόκειται επίσης σε περιφερειακούς κανονισμούς. Για παράδειγμα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η χρήση του ΥΦΑ προωθείται μέσω της οδηγίας για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών

καυσίμων, η οποία απαιτεί από τα κράτη μέλη να εξασφαλίσουν επαρκή αριθμό σημείων ανεφοδιασμού με ΥΦΑ σε θαλάσσιους και εσωτερικούς λιμένες.

Γενικά, το ΥΦΑ αποτελεί ένα καύσιμο που η χρήση του οδηγεί προς μια καθαρότερη και πιο βιώσιμη ναυτιλιακή βιομηχανία. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων του θα εξαρτηθεί από την υπέρβαση των υφιστάμενων προκλήσεων και τη συνεχή εξέλιξη των κανονισμών που προωθούν τη χρήση του, με την ταυτόχρονη αντιμετώπιση της ασφάλειας και των περιβαλλοντικών ζητημάτων. Καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία προσανατολίζεται στην αλλαγή των κανονισμών, της τεχνολογίας και του ενεργειακού εφοδιασμού, ο ρόλος του ΥΦΑ θα είναι καθοριστικός. Είναι ένα μεταβατικό καύσιμο που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων και των καυσίμων μηδενικών εκπομπών του μέλλοντος [65].

5.2 Χαρακτηριστικά ΥΦΑ

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο είναι φυσικό αέριο που έχει ψυχθεί στους -162 βαθμούς Κελσίου περίπου. Σε αυτή τη θερμοκρασία, το φυσικό αέριο συμπυκνώνεται σε υγρή μορφή, καθιστώντας ευκολότερη και ασφαλέστερη την αποθήκευση και τη μεταφορά του. Στην υγρή του κατάσταση, ο όγκος του φυσικού αερίου είναι περίπου το 1/600 του όγκου του σε αέρια κατάσταση σε κανονική θερμοκρασία και πίεση. Αυτή η σημαντική μείωση του όγκου επιτρέπει τη μεταφορά και αποθήκευση του φυσικού αερίου σε μεγάλες αποστάσεις, καθιστώντας το ένα σημαντικό καύσιμο στην παγκόσμια αλυσίδα ενεργειακού εφοδιασμού.

Το ΥΦΑ αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, αλλά περιέχει επίσης μικρές ποσότητες αιθανίου, προπανίου, βουτανίου και μερικών βαρύτερων υδρογονανθράκων. Οι υδρογονάνθρακες είναι τα στοιχεία που προσδίδουν στο ΥΦΑ τη θερμογόνο δύναμή του, με το μεθάνιο να αντιπροσωπεύει τη συντριπτική πλειονότητα αυτού του ενεργειακού περιεχομένου. Το μεθάνιο, που είναι ο απλούστερος και ελαφρύτερος υδρογονάνθρακας, έχει υψηλότερη αναλογία υδρογόνου προς άνθρακα, με αποτέλεσμα λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την καύση σε σύγκριση με άλλα ορυκτά καύσιμα. Ακαθαρσίες, όπως το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα, το θείο και το άζωτο, απομακρύνονται πριν από τη διαδικασία ψύξης του φυσικού αερίου, καθώς μπορούν να παγώσουν και να προκαλέσουν προβλήματα στη διαδικασία.

Στην υγρή του κατάσταση, το ΥΦΑ είναι διαυγές, άχρωμο, μη τοξικό και άοσμο. Δεν είναι διαβρωτικό ούτε καρκινογόνο. Είναι, ωστόσο, εξαιρετικά εύφλεκτο και, παρουσία θερμότητας και οξυγόνου, μπορεί να

αναφλεγεί. Είναι ζωτικής σημασίας να σημειωθεί ότι το ίδιο το ΥΦΑ δεν είναι εκρηκτικό, ωστόσο εάν οι ατμοί ΥΦΑ αναμειχθούν με αέρα και το μείγμα αναφλεγεί, μπορεί να προκληθεί πυρκαγιά ή έκρηξη.

Το ΥΦΑ έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από το συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG), γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος όπως στα πλοία. Επιπλέον, οι φυσικές ιδιότητες του ΥΦΑ το καθιστούν ως μια πολύ αποδοτική πηγή ενέργειας. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητά του και η αποδοτικότητα με την οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας με βάση τους υδρογονάνθρακες.

5.3 Διαδικασία καύσης

Η διαδικασία καύσης του υδροποιημένου φυσικού αερίου έχει κάποιες ομοιότητες με άλλα καύσιμα υδρογονανθράκων, αλλά οι φυσικές και χημικές ιδιότητές του παρουσιάζουν ορισμένες αξιοσημείωτες διαφορές. Η διαδικασία καύσης είναι η χημική αντίδραση μιας ουσίας με το οξυγόνο, η οποία απελευθερώνει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας και φωτός. Για το ΥΦΑ, η κύρια ουσία που υφίσταται καύση είναι το μεθάνιο.

Η αντίδραση καύσης του μεθανίου παρουσία οξυγόνου είναι: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{ενέργεια}$. Με απλούστερους όρους, ένα μόριο μεθανίου αντιδρά με δύο μόρια οξυγόνου και παράγει ένα μόριο διοξειδίου του άνθρακα, δύο μόρια νερού και θερμική ενέργεια.

Το μεθάνιο έχει υψηλότερη αναλογία υδρογόνου προς άνθρακα από οποιονδήποτε άλλο υδρογονάνθρακα, πράγμα που σημαίνει ότι η καύση του παράγει λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα για κάθε μονάδα θερμότητας που απελευθερώνεται. Αυτή η ιδιότητα είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους το ΥΦΑ θεωρείται πιο φιλικό προς το περιβάλλον καύσιμο σε σύγκριση με το πετρέλαιο ή τον άνθρακα.

Είναι απαραίτητο να αναφερθεί το ζήτημα της ολίσθησης μεθανίου, δηλαδή των εκπομπών άκαυστου μεθανίου που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα κατά τη διαδικασία καύσης. Το μεθάνιο είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου με δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη πολύ μεγαλύτερο από αυτό του διοξειδίου του άνθρακα. Η έκταση της ολίσθησης μεθανίου ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα και τις συνθήκες λειτουργίας, και μπορεί να εξουδετερώσει κάπως τα πλεονεκτήματα των αερίων του θερμοκηπίου που προσφέρει το ΥΦΑ, αν δεν γίνει σωστή διαχείριση.

Η υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης του ΥΦΑ και το στενό εύρος ευφλεκτότητάς του σε σύγκριση με άλλα καύσιμα υδρογονανθράκων μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά την καύση. Για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική καύση, το ΥΦΑ πρέπει πρώτα να εξατμιστεί, στη συνέχεια να αναμιχθεί με αέρα για να σχηματίσει καύσιμο μείγμα και τέλος να αναφλεγεί. Η διαδικασία της καύσης πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά, ώστε να διασφαλίζεται ότι συμβαίνει τη σωστή στιγμή και στο σωστό σημείο εντός του κινητήρα, ώστε να αποφεύγεται «χτύπημα» του κινητήρα ή η κακή ανάφλεξη.

Σε μεγάλες ναυτικές μηχανές, το ΥΦΑ χρησιμοποιείται συνήθως σε διάταξη διπλού καυσίμου, όπου αναμιγνύεται με καύσιμο ντίζελ για την ανάφλεξη. Το ΥΦΑ αρχικά εξατμίζεται και στη συνέχεια αναμιγνύεται με πεπιεσμένο αέρα στην πολλαπλή εισαγωγής. Το καύσιμο ντίζελ υψηλής πίεσης εγχέεται στη συνέχεια σε αυτό το μείγμα αέρα-αερίου και η θερμότητα του συμπιεσμένου αέρα και του καυσίμου ντίζελ προκαλεί την ανάφλεξη του μίγματος αερίου-αέρα.

Η χρήση του ΥΦΑ ως πηγή καυσίμου συνοδεύεται από πολλά πλεονεκτήματα λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών του και της διαδικασίας καύσης. Είναι λιγότερο ρυπογόνο και πιο αποδοτικό από άλλα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετές προκλήσεις, όπως η διαχείριση της ολίσθησης του μεθανίου, η ανάγκη για εξειδικευμένο χειρισμό λόγω της κρουγονικής του φύσης, και η ακόμη αναπτυσσόμενη παγκόσμια υποδομή δεξαμενισμού, προκειμένου να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητές του.

5.4 Εγκατάσταση συστήματος σε πλοίο

Η χρήση του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως ναυτιλιακό καύσιμο απαιτεί αρκετές βασικές τροποποιήσεις στα συστήματα και την υποδομή ενός πλοίου. Από την αποθήκευση και τον ανεφοδιασμό με καύσιμα έως τις τροποποιήσεις των κινητήρων και τα ζητήματα ασφάλειας, η μετάβαση στο ΥΦΑ είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Η παρούσα ενότητα θα εμβαθύνει σε αυτές τις πτυχές, αναδεικνύοντας τον περίπλοκο χαρακτήρα της υιοθέτησης του ΥΦΑ ως πηγής καυσίμου επί του πλοίου.

5.4.1 Αποθήκευση καυσίμου και δεξαμενή καυσίμου

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά υγρά καύσιμα, το ΥΦΑ πρέπει να αποθηκεύεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (-162°C) για να διατηρείται σε υγρή κατάσταση. Ως εκ τούτου, απαιτούνται ειδικές μονωμένες δεξαμενές αποθήκευσης. Οι δύο κύριοι τύποι δεξαμενών που χρησιμοποιούνται για το ΥΦΑ είναι οι δεξαμενές τύπου C, οι οποίες είναι ουσιαστικά δοχεία υπό πίεση, και οι δεξαμενές μεμβράνης, οι οποίες δεν βρίσκονται υπό πίεση και στηρίζονται στο κύτος του πλοίου.

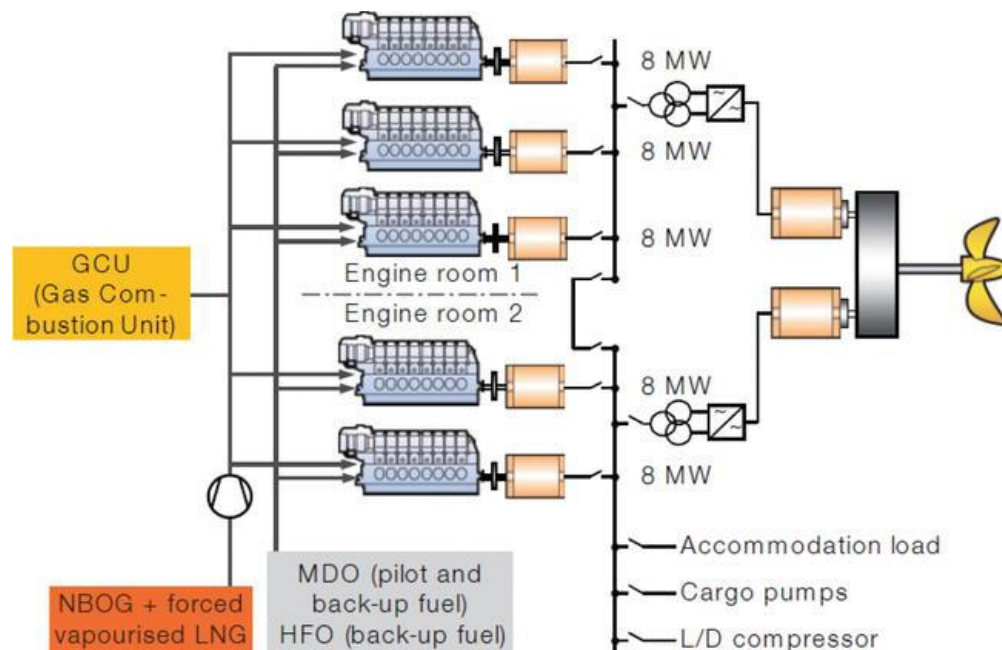
Οι δεξαμενές τύπου C είναι μικρότερες, ιδιαίτερα ανθεκτικές και μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε στο πλοίο. Κατασκευάζονται συνήθως από κραματωμένο ανοξείδωτο χάλυβα για να αντέχουν σε κρυογονικές θερμοκρασίες και έχουν σχήμα οβάλ ή σφαιρικό για να αντέχουν στην πίεση.

Οι δεξαμενές μεμβράνης είναι μεγαλύτερες και ενσωματώνονται στο κύτος του πλοίου. Αυτές οι δεξαμενές αποτελούνται από μια πρωτεύουσα και μια δευτερεύουσα λεπτή μεμβράνη από Invar, ένα υλικό που έχει πολύ χαμηλή θερμική συστολή. Οι μεμβράνες περιέχουν το ΥΦΑ και υποστηρίζονται από στρώματα μόνωσης και το ίδιο το κύτος του πλοίου.

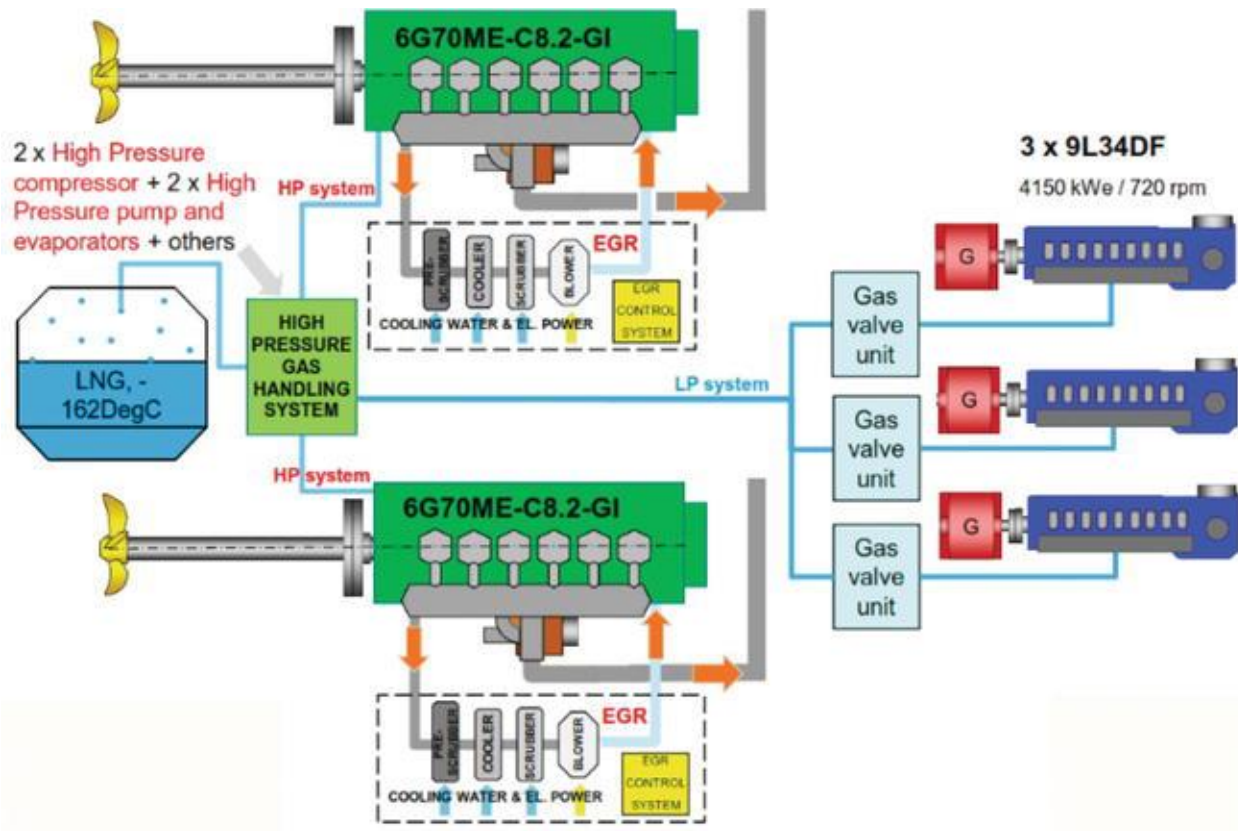
Η επιλογή μεταξύ δεξαμενών τύπου C και δεξαμενών μεμβράνης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος του πλοίου, η προβλεπόμενη λειτουργία και οι προτιμήσεις σχεδιασμού.

5.4.2 Τροποποιήσεις μηχανοστασίου

Τα πλοία που λειτουργούν με υγροποιημένο φυσικό αέριο απαιτούν ειδικά σχεδιασμένους κινητήρες. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι κινητήρων για πλοία με καύσιμο ΥΦΑ: πετρελαιοηλεκτρικοί κινητήρες διπλού καυσίμου (DFDE - Dual Fuel Diesel Electric) (εικόνα 33), πετρελαιοηλεκτρικοί κινητήρες τριπλού καυσίμου (TFDE - Tri-Fuel Diesel Electric) και δίχρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου (two-stroke Dual Fuel dual-fuel) (εικόνα 34).



Εικόνα 32: Σχηματικό διάγραμμα ναυτικής μηχανής LNG Dual Fuel Diesel Electric [66]



Εικόνα 33: Σχηματικό διάγραμμα ναυτικής μηχανής LNG Two-stroke Dual Fuel (ME-GI - high-pressure gas) [66]

Οι κινητήρες διπλού καυσίμου είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν τόσο με φυσικό αέριο όσο και με ντίζελ. Αυτοί οι κινητήρες μεταβαίνουν σε λειτουργία ντίζελ όταν διακόπτεται η παροχή υγροποιημένου φυσικού αερίου ή κατά τη διάρκεια ελιγμών σε λιμάνια για λόγους ασφαλείας. Ωστόσο, κατά τη μετασκευή των υφιστάμενων πλοίων για τη χρήση ΥΦΑ, απαιτούνται τροποποιήσεις ή ακόμη και αντικατάσταση του υφιστάμενου κινητήρα. Επιπλέον, καθώς το ΥΦΑ απαιτεί διαφορετικό σύστημα τροφοδοσίας από το ντίζελ, οι σωληνώσεις, οι βαλβίδες και τα συστήματα ελέγχου του πλοίου πρέπει να τροποποιηθούν ή να αντικατασταθούν για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα με το ΥΦΑ. Για τα νέα πλοία, οι κινητήρες αυτοί μπορούν να εγκατασταθούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής, ωστόσο συνήθως απαιτούν περισσότερο χώρο λόγω του συστήματος διπλού καυσίμου.

5.4.3 Πυρασφάλεια

Το ΥΦΑ ενέχει εγγενείς κινδύνους πυρκαγιάς και έκρηξης λόγω της υψηλής ευφλεκτότητάς του. Ως εκ τούτου, πρέπει να εφαρμόζονται αυστηρά μέτρα ασφαλείας. Οι δεξαμενές αποθήκευσης σχεδιάζονται με βαλβίδες ασφαλείας που απελευθερώνουν το αέριο εάν η πίεση αυξηθεί πολύ ψηλά. Σε περίπτωση

διαρροής αερίου, τα σύγχρονα πλοία είναι εξοπλισμένα με εκτεταμένα συστήματα ανίχνευσης και εξαερισμού αερίου για την αποφυγή συσσώρευσης αερίου.

Επιπλέον, τα συστήματα πυρασφάλειας πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του ΥΦΑ. Τα παραδοσιακά συστήματα πυρόσβεσης με βάση το νερό ενδέχεται να μην είναι αποτελεσματικά λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του υγροποιημένου φυσικού αερίου, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε πάγωμα του νερού. Ως εκ τούτου, συχνά προτιμώνται συστήματα πυρόσβεσης με ξηρά χημικά.

Επιπλέον, η εκπαίδευση των μελών του πληρώματος για την κατανόηση και την ασφαλή εργασία με το ΥΦΑ είναι απαραίτητη. Το πλήρωμα πρέπει να είναι εξοικειωμένο με τα χαρακτηριστικά του ΥΦΑ και τα μέτρα ασφαλείας που ισχύουν στο πλοίο.

5.5 Ανεφοδιασμός πλοίων ΥΦΑ

Ο ανεφοδιασμός των πλοίων που κινούνται με ΥΦΑ περιλαμβάνει διαδικασίες και τεχνολογίες που δεν απαιτούνται για τα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα. Οι δύο κύριες μέθοδοι ανεφοδιασμού πλοίων με ΥΦΑ είναι η μεταφορά από πλοίο σε πλοίο και η μεταφορά από τερματικό σταθμό σε πλοίο. Μια τρίτη μέθοδος, η μεταφορά από φορτηγό βυτιοφόρο σε πλοίο, είναι λιγότερο διαδεδομένη αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις. Κάθε μέθοδος έχει τις δικές της τεχνικές και συστήματα [67].

5.5.1 Ανεφοδιασμός από τερματικό σταθμό σε πλοίο

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου από έναν τερματικό σταθμό στην ξηρά σε ένα πλοίο. Είναι παραδοσιακή μέθοδος και έχει το πλεονέκτημα της υποδομής μεγάλης κλίμακας και της ικανότητας να παραδίδει σημαντικές ποσότητες ΥΦΑ.

Η διαδικασία περιλαμβάνει συνήθως τη σύνδεση ενός αρθρωτού βραχίονα φόρτωσης ή εύκαμπτων κρουαυλικών σωλήνων από τον τερματικό σταθμό στο πλοίο. Στη συνέχεια, το ΥΦΑ αντλείται από τις δεξαμενές αποθήκευσης του τερματικού σταθμού μέσω αυτών των συνδέσεων στις δεξαμενές αποθήκευσης του πλοίου. Ο ρυθμός μεταφοράς μπορεί να είναι αρκετά υψηλός, συντομεύοντας τον συνολικό χρόνο της διαδικασίας ανεφοδιασμού.

Ο τερματικός σταθμός διαθέτει επίσης συστήματα για τη διαχείριση του boil-off gas (BOG), του ατμού φυσικού αερίου που σχηματίζεται καθώς το LNG θερμαίνεται. Το αέριο αυτό μπορεί να συλλεχθεί και να υγροποιηθεί εκ νέου ή να χρησιμοποιηθεί εντός του τερματικού σταθμού για την παραγωγή ενέργειας.

5.5.2 Ανεφοδιασμός από πλοίο σε πλοίο

Σε αυτή τη μέθοδο, ένα μικρότερο πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ, που συχνά αναφέρεται ως LNG bunkering vessels με τυπική χωρητικότητα έως 10.000 m³, χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ΥΦΑ στο πλοίο υποδοχής. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία από τον ανεφοδιασμό από τερματικό σε πλοίο, επειδή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διάφορες τοποθεσίες, συμπεριλαμβανομένων λιμένων χωρίς υποδομές ΥΦΑ.

Η διαδικασία είναι παρόμοια με τον ανεφοδιασμό από τερματικό σε πλοίο, με κρουονικούς σωλήνες ή αρθρωτούς βραχίονες που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των δύο πλοίων. Η κύρια πρόκληση αυτής της μεθόδου είναι η ασφαλής και ασφαλής πρόσδεση των δύο πλοίων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, ιδίως εάν η λειτουργία πραγματοποιείται στη θάλασσα και όχι σε λιμάνι.

5.5.3 Ανεφοδιασμός από φορτηγό σε πλοίο

Σε αυτή τη λιγότερο διαδεδομένη μέθοδο, το ΥΦΑ μεταφέρεται στο πλοίο μέσω φορτηγών βυτιοφόρων. Κάθε φορτηγό συνδέεται με τη σειρά του με το πλοίο χρησιμοποιώντας κρουονικούς σωλήνες και το ΥΦΑ αντλείται στο πλοίο. Η μέθοδος αυτή είναι αργή, δεδομένης της σχετικά μικρής ποσότητας ΥΦΑ που μπορεί να μεταφέρει κάθε φορτηγό, και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται συνήθως μόνο για μικρότερα πλοία ή σε τοποθεσίες χωρίς άλλες επιλογές για δεξαμενισμό ΥΦΑ.

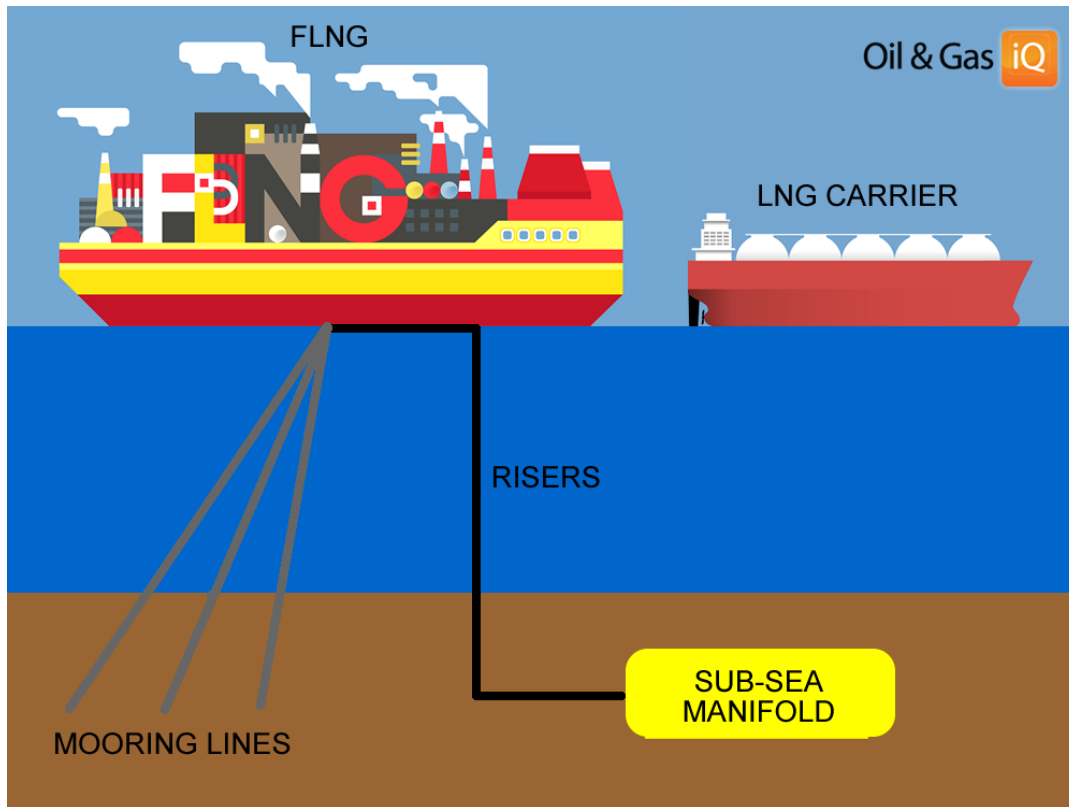
Ανεξάρτητα από τη μέθοδο ανεφοδιασμού, η ασφάλεια αποτελεί κρίσιμη πτυχή όλων των εργασιών υγροποιημένου φυσικού αερίου. Εκτός από τις συνήθεις εκτιμήσεις ασφαλείας για τη μεταφορά καυσίμων, η κρουονική φύση του ΥΦΑ εισάγει πρόσθετους κινδύνους. Η σωστή επιλογή και συντήρηση του εξοπλισμού, οι προσεκτικές διαδικασίες και το εκπαιδευμένο προσωπικό είναι όλα βασικά συστατικά στοιχεία των ασφαλών εργασιών ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου.

5.6 Πλωτές μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και επαναεριοποίησης ΥΦΑ

Οι τεχνολογίες σχετικά με το υγροποιημένο φυσικό αέριο εξελίσσονται ραγδαία και η έλευση του πλωτού LNG (FLNG) και των πλωτών μονάδων αποθήκευσης και επαναεριοποίησης (FSRU) είναι ενδεικτική αυτής της προόδου. Αυτές οι προηγμένες τεχνολογίες προσφέρουν μοναδικές λύσεις στις προκλήσεις της παραγωγής, αποθήκευσης και επαναεριοποίησης υγροποιημένου φυσικού αερίου, ιδίως σε απομακρυσμένες ή βαθιές θαλάσσιες τοποθεσίες.

5.6.1 Πλωτή μονάδα παραγωγής ΥΦΑ (FLNG)

Η τεχνολογία FLNG αποτελεί καινοτόμο εξέλιξη στη βιομηχανία υγροποιημένου φυσικού αερίου. Όπως υποδηλώνει το όνομα, μια εγκατάσταση FLNG είναι μια πλωτή μονάδα (συνήθως σκάφος) που παράγει, υγροποιεί, αποθηκεύει LNG, και μπορεί επίσης να το εκφορτώσει σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ (LNG carriers) (εικόνα 34). Το πρώτο λειτουργικό FLNG στον κόσμο, το Prelude της Shell, ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2018 στα ανοικτά των ακτών της Δυτικής Αυστραλίας [68].



Εικόνα 34: Πλωτή μονάδα FLNG [69]

Οι εγκαταστάσεις FLNG επιφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα. Επιτρέπουν την εκμετάλλευση υπεράκτιων πόρων φυσικού αερίου που διαφορετικά θα ήταν πολύ δαπανηρή ή δύσκολη η εκμετάλλευσή τους. Εξαλείφουν επίσης την ανάγκη για μεγάλου μήκους υποθαλάσσιους αγωγούς προς τις εγκαταστάσεις LNG στην ξηρά, μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές και προσφέρουν τη δυνατότητα καλύτερης ασφάλειας και λιγότερων διαταραχών της κοινότητας.

Ωστόσο, οι εγκαταστάσεις υγροποιημένου φυσικού αερίου παρουσιάζουν επίσης σημαντικές τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις. Αυτές περιλαμβάνουν τη διαχείριση της δυναμικής μιας πλωτής

εγκατάστασης, την αντιμετώπιση της εύφλεκτης και δυνητικά εκρηκτικής φύσης του φυσικού αερίου και τον χειρισμό των τεχνικών περιπλοκών της παραγωγής υγροποιημένου φυσικού αερίου σε θαλάσσιο περιβάλλον.

5.6.2 Πλωτή μονάδα αποθήκευσης και επαναεριοποίησης ΥΦΑ (FSRU)

Οι FSRU αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της αλυσίδας εφοδιασμού LNG. Πρόκειται ουσιαστικά για μια πλωτή εγκατάσταση (συνήθως πλοίο) αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου εξοπλισμένα με τεχνολογία επαναεριοποίησης (εικόνα 35). Οι FSRU παραλαμβάνουν ΥΦΑ από τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, το αποθηκεύουν και στη συνέχεια μετατρέπουν το ΥΦΑ σε φυσικό αέριο για διοχέτευση στο τοπικό δίκτυο φυσικού αερίου [70].



Εικόνα 35: MOL FSRU Challenger, επίσης γνωστή ως η μεγαλύτερη πλωτή μονάδα αποθήκευσης και επαναεριοποίησης στον κόσμο [71]

Τα FSRU προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς, χερσαίους τερματικούς σταθμούς επαναεριοποίησης ΥΦΑ. Πρώτον, προσφέρουν κινητικότητα. Εάν η ζήτηση μετατοπιστεί ή σταματήσει, ένα FSRU μπορεί να μεταφερθεί σε μια νέα αγορά, μειώνοντας τον κίνδυνο των αδρανών περιουσιακών στοιχείων. Δεύτερον, μπορούν συνήθως να αναπτυχθούν ταχύτερα και με χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου από έναν χερσαίο τερματικό σταθμό. Τέλος, προσφέρουν έναν βαθμό

επεκτασιμότητας. Μπορούν να προστεθούν πρόσθετα FSRU αν αυξηθεί η ζήτηση και να αφαιρεθούν αν μειωθεί η ζήτηση.

Ωστόσο, όπως και τα FLNG, τα FSRU παρουσιάζουν επίσης ορισμένες προκλήσεις. Αυτές περιλαμβάνουν την εξασφάλιση επαρκούς βάθους και συνθηκών θάλασσας για την ασφαλή πρόσδεση της FSRU, τη δημιουργία της απαραίτητης υποδομής για τη σύνδεση της FSRU με το τοπικό δίκτυο φυσικού αερίου και τη διαχείριση των λειτουργικών περιπλοκών της επαναεριοποίησης του ΥΦΑ σε πλωτή εγκατάσταση.

Οι τεχνολογίες FLNG και FSRU προσφέρουν συναρπαστικές δυνατότητες για την επέκταση και τον εξορθολογισμό της παγκόσμιας αλυσίδας εφοδιασμού ΥΦΑ, ιδίως σε αναπτυσσόμενες περιοχές ή απομακρυσμένες τοποθεσίες. Καθώς η ζήτηση για φυσικό αέριο συνεχίζει να αυξάνεται, αυτές οι πλωτές εγκαταστάσεις είναι πιθανό να διαδραματίσουν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στο παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο.

6. Συμπεράσματα

Η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται στα πρόθυρα μετασχηματισμού προς μια ναυτιλία απελευθερωμένη από ρύπους και με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα, συμμορφωμένη με τις απαιτήσεις για περιβαλλοντολογική βιωσιμότητα. Όπως περιγράφει λεπτομερώς η παρούσα διπλωματική εργασία, το ταξίδι προς την πράσινη ναυτιλία περιλαμβάνει μια πληθώρα προκλήσεων και λύσεων, η καθεμία με τις μοναδικές της δυνατότητες και παγίδες.

Παγκόσμια επιταγή: Ο ναυτιλιακός κλάδος και συγκεκριμένα οι θαλάσσιες μεταφορές, είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά πάνω από το 90% του παγκόσμιου εμπορίου, και αυτό αποτελεί απόδειξη ότι ο ρόλος του στην παγκόσμια οικονομία είναι αναντικατάστατος. Ωστόσο, οι επιπτώσεις του στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά περίπου 3% υπογραμμίζει τον επείγοντα χαρακτήρα του μετασχηματισμού. Καθώς απομακρυνόμαστε από τις παραδοσιακές πρακτικές, η μετάβαση δεν αφορά απλώς την τήρηση των κανονισμών αλλά την προληπτική στάση απέναντι στην επικείμενη απειλή της κλιματικής αλλαγής.

Τεχνολογικοί ορίζοντες: Η εις βάθος ανάλυση των πράσινων τεχνολογιών υπογραμμίζει τη δυνατότητά τους να φέρουν επανάσταση στις ναυτιλιακές πρακτικές. Από τα εναλλακτικά καύσιμα έως την αιολική ενέργεια και από την προηγμένη υδροδυναμική έως την πυρηνική πρόωση, η τεχνολογική εξέλιξη προσφέρει πολλές δυνατότητες. Ωστόσο, η βιωσιμότητα κάθε τεχνολογίας είναι συνυφασμένη με υλικοτεχνικούς, οικονομικούς και ρυθμιστικούς παράγοντες.

Ρυθμιστική πλοήγηση: Το μεταβατικό ταξίδι δεν υπαγορεύεται αποκλειστικά από τις τεχνολογικές εξελίξεις. Τα ρυθμιστικά πλαίσια διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό του περιγράμματος αυτής της μετάβασης. Ενώ υπάρχει μια παγκόσμια δυναμική προς την κατεύθυνση αυστηρών περιβαλλοντικών κανόνων, η πρόκληση έγκειται στη διαμόρφωση κανονισμών που ενθαρρύνουν την καινοτομία και ταυτόχρονα διασφαλίζουν τη σκοπιμότητα και την ασφάλεια.

Πολιτιστικές και οικονομικές αλλαγές: Πέρα από την τεχνολογία και τους κανονισμούς, η μετάβαση προς τη βιωσιμότητα απαιτεί την αναθεώρηση του ήθους της βιομηχανίας. Τα οικονομικά κίνητρα, σε συνδυασμό με μια πολιτιστική αλλαγή που δίνει έμφαση στην περιβαλλοντική διαχείριση, είναι υψίστης σημασίας. Η εξέλιξη δεν αφορά μόνο την υιοθέτηση νέων εργαλείων, αλλά και τον επαναπροσδιορισμό των ίδιων των αρχών που διέπουν το θαλάσσιο εμπόριο.

Μελλοντικές διαδρομές: Τα μελλοντικά σενάρια, όπως αποτυπώνονται σε αυτή την εργασία, δείχνουν έναν κλάδο που βρίσκεται σε εξέλιξη. Οι πρωτοβουλίες από διάφορους φορείς για υιοθέτηση των

πράσινων τεχνολογιών είναι ελπιδοφόρες. Ωστόσο, η διαδρομή προς την πράσινη ναυτιλία θα απαιτήσει συνεργασίες μεταξύ των τομέων, ανταλλαγή γνώσεων και δέσμευση για συνεχή μάθηση.

Συνοψίζοντας, η εργασία "Μετάβαση στην πράσινη ναυτιλία - Πράσινες τεχνολογίες στα πλοία" ταξίδεψε στον απέραντο ωκεανό των δυνατοτήτων και των προκλήσεων της ναυτιλιακής βιωσιμότητας. Η στροφή του κλάδου στις πράσινες τεχνολογίες δεν είναι απλώς μια επιχειρησιακή στροφή, αλλά μια απόδειξη της προσαρμοστικότητας και της δέσμευσής του για παγκόσμια ευημερία. Ο χώρος της ναυτιλίας, υποστηριζόμενος από την καινοτομία και την αποφασιστικότητα, είναι έτοιμος να χαράξει μια πορεία που εξισορροπεί τις οικονομικές επιταγές με την περιβαλλοντική ευθύνη, εξασφαλίζοντας μια αρμονική συνύπαρξη με τον πλανήτη μας.

Βιβλιογραφία

- [1] P. Balcombe *et al.*, “How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 182, pp. 72–88, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.080.
- [2] “Energy Transitions Commission: The First Wave. A... - Μελετητής Google.” Accessed: Jul. 19, 2023. [Online]. Available: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The+First+Wave.+A+Blueprint+for+Commercial-Scale+Zero-Emission+Shipping+Pilots&author=Energy+Transitions+Commission&publication_year=2020
- [3] “International Maritime Organization.” Accessed: Jul. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en>
- [4] “Collaboration is key to scale up fuel availability in time - DNV,” DNV GL. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Collaboration-is-key-to-scale-up-fuel-availability-in-time.html>
- [5] “Market-Based Measures.” Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Market-Based-Measures.aspx>
- [6] “Fit for 55.” Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- [7] “What is Air Lubrication?,” Silverstream Technologies. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.silverstream-tech.com/what-is-air-lubrication/>
- [8] P. Pan, Y. Sun, C. Yuan, X. Yan, and X. Tang, “Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, p. 111048, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111048.
- [9] N. Speranza, B. Kidd, M. P. Schultz, and I. M. Viola, “Modelling of hull roughness,” *Ocean Eng.*, vol. 174, pp. 31–42, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.033.
- [10] “Azipod® electric propulsion,” Marine. Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/azipod>

- [11] C.-S. Yang, "An analysis of institutional pressures, green supply chain management, and green performance in the container shipping context," *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 61, pp. 246–260, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2017.07.005.
- [12] S. K. Jayaraman, "Fuel selection by the shipping industry due to a multifarious framework for achieving zero carbon and greenhouse gas emissions by 2050".
- [13] DNV, "Maritime Forecast to 2050, Energy Transition Outlook 2022", 2022 Edition, Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2023/index.html>.
- [14] P. Cariou and E. Lindstad, "Container Shipping Decarbonization Pathways," in *New Maritime Business*, B.-W. Ko and D.-W. Song, Eds., in WMU Studies in Maritime Affairs. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 75–93. doi: 10.1007/978-3-030-78957-2_5.
- [15] Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, Q. Li, and T. Long, "A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship," *Energy*, vol. 165, pp. 965–978, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.085.
- [16] DNV, "Energy Transition Outlook 2022, A global and regional forecast to 2050", 2022 Edition, Accessed: Jun. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/DNV_Energy_Transition_Outlook_2022_main_report.pdf.
- [17] "Energy transition offers innovators a competitive edge through 'carbon robust' ship designs," Docks The Future. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.docksthefuture.eu/energy-transition-offers-innovators-a-competitive-edge-through-carbon-robust-ship-designs/>
- [18] R. Tang, "Large-scale photovoltaic system on green ship and its MPPT controlling," *Sol. Energy*, vol. 157, pp. 614–628, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.08.058.
- [19] "Photovoltaic effect - Energy Education." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect
- [20] "EnergySail," Eco Marine Power. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecomarinepower.com/en/energysail>
- [21] I. S. Seddiek and N. R. Ammar, "Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 25, pp. 32695–32707, Jul. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-12791-3.

- [22] “Renewable Energy Options for Shipping”.
- [23] X. Li *et al.*, “A method for optimizing installation capacity and operation strategy of a hybrid renewable energy system with offshore wind energy for a green container terminal,” *Ocean Eng.*, vol. 186, p. 106125, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106125.
- [24] “Adoption of biofuels for marine shipping decarbonization: A long-term price and scalability assessment - Tan - 2022 - Biofuels, Bioproducts and Biorefining - Wiley Online Library.” Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bbb.2350>
- [25] “Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II).” Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en
- [26] D. Chiaramonti and T. Goumas, “Impacts on industrial-scale market deployment of advanced biofuels and recycled carbon fuels from the EU Renewable Energy Directive II,” *Appl. Energy*, vol. 251, p. 113351, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113351.
- [27] H. Bach, T. Mäkitie, T. Hansen, and M. Steen, “Blending new and old in sustainability transitions: Technological alignment between fossil fuels and biofuels in Norwegian coastal shipping,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 74, p. 101957, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.101957.
- [28] E. C. D. Tan *et al.*, “Biofuel Options for Marine Applications: Technoeconomic and Life-Cycle Analyses,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 11, pp. 7561–7570, Jun. 2021, doi: 10.1021/acs.est.0c06141.
- [29] Y. Sun, X. Yan, C. Yuan, and X. Bai, “Insight into tribological problems of green ship and corresponding research progresses,” *Friction*, vol. 6, no. 4, pp. 472–483, Dec. 2018, doi: 10.1007/s40544-017-0184-4.
- [30] “JMSE | Free Full-Text | A Review of Point Absorber Wave Energy Converters.” Accessed: Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/10/1534>
- [31] D. Howe and J.-R. Nader, “OWC WEC integrated within a breakwater versus isolated: Experimental and numerical theoretical study,” *Int. J. Mar. Energy*, vol. 20, pp. 165–182, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.ijome.2017.07.008.

- [32] K. Rezanejad and C. Guedes Soares, "Enhancing the primary efficiency of an oscillating water column wave energy converter based on a dual-mass system analogy," *Renew. Energy*, vol. 123, pp. 730–747, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.02.084.
- [33] L. Wan, M. Greco, C. Lugni, Z. Gao, and T. Moan, "A combined wind and wave energy-converter concept in survival mode: Numerical and experimental study in regular waves with a focus on water entry and exit," *Appl. Ocean Res.*, vol. 63, pp. 200–216, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.apor.2017.01.013.
- [34] "Design concepts of supercritical water-cooled reactor (SCWR) and nuclear marine vessel: A review - ScienceDirect." Accessed: Jul. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0149197020300779>
- [35] "The Fission Process | MIT Nuclear Reactor Laboratory." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://nrl.mit.edu/reactor/fission-process>
- [36] "Reactor Compartment and Engine Room." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.subguru.com/nautilus/Reactor_compartment_and_engineroom.htm
- [37] H. Schøyen and K. Steger-Jensen, "Nuclear propulsion in ocean merchant shipping: The role of historical experiments to gain insight into possible future applications," *J. Clean. Prod.*, vol. 169, pp. 152–160, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.163.
- [38] M. Liu, C. Li, E. K. Koh, Z. Ang, and J. S. L. Lam, "Is methanol a future marine fuel for shipping?," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1357, no. 1, p. 012014, Jul. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1357/1/012014.
- [39] M. Svanberg, J. Ellis, J. Lundgren, and I. Landälv, "Renewable methanol as a fuel for the shipping industry," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, pp. 1217–1228, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.058.
- [40] A. Srivastava, "Compliant strategy for shipowners for sustainable maritime transport," 2016. doi: 10.13140/RG.2.2.21639.60324.
- [41] F. Y. Al-Aboosi, M. M. El-Halwagi, M. Moore, and R. B. Nielsen, "Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 31, p. 100670, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.coche.2021.100670.

- [42] G. Mallouppas, C. Ioannou, and E. A. Yfantis, "A Review of the Latest Trends in the Use of Green Ammonia as an Energy Carrier in Maritime Industry," *Energies*, vol. 15, no. 4, Art. no. 4, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15041453.
- [43] "Concept Design for Ammonia-Fuel Ready LNG-Fueled Vessel Completed | NYK Line." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.nyk.com/english/news/2022/20220303_01.html
- [44] "ShipFC," ShipFC. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://shipfc.eu>
- [45] A. Forsyth, "Ruling the waves? Future of H2 and fuel cells in shipping," *Fuel Cells Bull.*, vol. 2022, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.12968/S1464-2859(22)70043-0.
- [46] Z. Wang, Y. Wang, S. Afshan, and J. Hjalmarsson, "A review of metallic tanks for H2 storage with a view to application in future green shipping," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 9, pp. 6151–6179, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.168.
- [47] ERIA, 2020, "Review of Hydrogen Transport Cost and Its Perspective (Liquefied Hydrogen)", Kimura, S., I. Kutani, O. Ikeda, and R. Chihiro (eds.), Demand and Supply Potential of Hydrogen Energy in East Asia – Phase 2. ERIA Research Project Report FY2020 no. 16, Jakarta: ERIA, pp.60-89.
- [48] "HySHIP: inside Europe's flagship hydrogen ship demonstrator project - Ship Technology Global | Issue 74 | January 2021." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://ship.nridigital.com/ship_jan21/hydrogen_ship_emissions
- [49] "Degree of Ambition and Renewable Energy in Shipping." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://encyclopedia.pub/entry/33775>
- [50] M. Perčić, N. Vladimir, I. Jovanović, and M. Koričan, "Application of fuel cells with zero-carbon fuels in short-sea shipping," *Appl. Energy*, vol. 309, p. 118463, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118463.
- [51] "Figure 1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell schematic representation...", ResearchGate. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Proton-Exchange-Membrane-Fuel-Cell-schematic-representation-Based-on-the-polarization-I_fig1_271156635
- [52] "Sustainability | Free Full-Text | Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives." Accessed: Aug. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1213>

- [53] "Fuel Cells." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://dieselnet.com/tech/energy_powertrains_fuel-cell.php
- [54] "High-capacity hydrogen fuel cell project moves towards trials," Riviera. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/high-capacity-hydrogen-fuel-cell-project-moves-towards-trials-56740>
- [55] "Hydrogen Refueling Station - HyQube 500 | HYFINDR." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://hyfindr.com/marketplace/systems/hydrogen-refueling-stations/hydrogen-refueling-station-hyqube-500/>
- [56] "Energy Observer." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.energy-observer.org/>
- [57] "Viking Lady," Wartsila.com. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/offshore/viking-lady>
- [58] "Welcome to HySeasIII." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.hyseas3.eu/>
- [59] "Vessel Characteristics: Ship NEMO H2 (Inland, Passenger Ship without Accommodation) Registered in Netherlands - Vessel details, Current position and Voyage information - Call Sign PB5658 | AIS Marine Traffic." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:246438/mmsi:244730602/imo:0/vessel:NEMO_H2
- [60] "Skärgårdsbåtar.se - Sjövägen (2014)." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: https://skargardsbatar.se/sjovagen_2014/
- [61] "AIDANOVA, Passenger (Cruise) Ship - Details and current position - IMO 9781865 - VesselFinder." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.vesselfinder.com/vessels/details/9781865>
- [62] H. Jang *et al.*, "Parametric trend life cycle assessment for hydrogen fuel cell towards cleaner shipping," *J. Clean. Prod.*, vol. 372, p. 133777, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133777.
- [63] M. M. Foss and A. Parkway, "An overview on liquefied natural gas (LNG), its properties, the LNG industry, and safety considerations".

- [64] P. Balcombe, I. Staffell, I. G. Kerdan, J. F. Speirs, N. P. Brandon, and A. D. Hawkes, "How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis," *Energy*, vol. 227, p. 120462, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120462.
- [65] B. Vuskovic, I. Rudan, and M. Sumner, "Fostering Sustainable LNG Bunkering Operations: Development of Regulatory Framework," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, Art. no. 9, Jan. 2023, doi: 10.3390/su15097358.
- [66] H. Tu, "Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers," 2019. doi: 10.5772/intechopen.82154.
- [67] M. Feenstra, J. Monteiro, J. T. van den Akker, M. R. M. Abu-Zahra, E. Gilling, and E. Goetheer, "Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 85, pp. 1–10, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.ijggc.2019.03.008.
- [68] W. Zhao *et al.*, "Current practice and research directions in hydrodynamics for FLNG-side-by-side offloading," *Ocean Eng.*, vol. 158, pp. 99–110, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.076.
- [69] P. Gallagher, "A guide to FLNG (floating liquefied natural gas)," Oil & Gas IQ. Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.oilandgasiq.com/fpso-flng/articles/guide-to-flng>
- [70] D. A. Wood and M. Kulitsa, "A review: Optimizing performance of Floating Storage and Regasification Units (FSRU) by applying advanced LNG tank pressure management strategies," *Int. J. Energy Res.*, vol. 42, no. 4, pp. 1391–1418, 2018, doi: 10.1002/er.3883.
- [71] "World's largest FSRU receives first LNG ahead of Hong Kong LNG terminal launch - Offshore Energy." Accessed: Feb. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.offshore-energy.biz/worlds-largest-fsru-receives-first-lng-ahead-of-hong-kong-lng-terminal-launch/>