



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
**«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – [epminfo@power.ece.ntua.gr](mailto:epminfo@power.ece.ntua.gr)

## **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Η ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ  
ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ  
ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ»**

### **Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

Στέφανος Γουλέτας

### **Επιβλέπων**

Ιωάννης Προυσαλίδης, Καθηγητής, Σχολή Ναυπηγών  
Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

---

Αθήνα, Οκτώβριος, 2023

# 1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....</b>                                 | <b>8</b>  |
| 3.1. Φαινόμενο του Θερμοκηπίου.....                                     | 8         |
| 3.2. Συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement).....                       | 12        |
| 3.3. Green Deal.....  | 13        |
| 3.4. IMO.....   | 14        |
| 3.4.1. EEDI.....  | 15        |
| 3.4.2. SEEMP.....   | 19        |
| 3.4.3. DCS.....   | 20        |
| 3.4.4. EEXI.....  | 20        |
| 3.4.5. CII.....   | 23        |
| 3.5. Τεχνολογικές Λύσεις.....   | 25        |
| 3.5.1. Εναλλακτικά Καύσιμα.....   | 25        |
| 3.5.2. Κυψέλες Καυσίμου.....  | 52        |
| 3.5.3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....                                 | 61        |
| <b>4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (Case study: Application on Tanker Vessel).....</b>   | <b>76</b> |
| 4.1. Εναλλακτικά Καύσιμα.....   | 77        |
| 4.1.1. LNG ή Αιθανόλη.....  | 77        |
| 4.1.2. LPG ή Μεθανόλη.....  | 79        |
| 4.2. Αιολική Ενέργεια.....  | 80        |
| 4.3. Κυψέλες Καυσίμου.....  | 83        |
| 4.4. Ηλιακή Ενέργεια.....   | 86        |
| <b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>   | <b>90</b> |
| 5.1. Καταναλώσεις και Εκπομπές CO <sub>2</sub> πριν τις μετατροπές..... | 90        |
| 5.1.1. INVICTUS.....  | 90        |
| 5.1.2. PROSPEROUS.....  | 91        |
| 5.2. Καταναλώσεις και Εκπομπές CO <sub>2</sub> μετά τις μετατροπές..... | 92        |
| 5.2.1. INVICTUS.....  | 92        |
| 5.2.2. PROSPEROUS.....  | 94        |
| 5.3. Συμπεράσματα.....  | 96        |
| <b>6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>   | <b>97</b> |
| <b>7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>   | <b>98</b> |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| <b>ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:</b> | <b>«Η Απανθρακοποίηση της Παραγωγής και της Διαχείρισης Ενέργειας με έμφαση στην Ναυτιλία»</b> |
| <b>ΦΟΙΤΗΤΗΣ:</b>             | <b>Στέφανος Γουλέτας</b>   |
| <b>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:</b>            | <b>Ιωάννης Προυσαλίδης, Καθηγητής, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.</b>             |
| <b>ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:</b>      | <b>2021-2023</b>   |

## Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία έχει γίνει η ανάλυση του θέματος η απανθρακοποίηση της Παραγωγής και της Διαχείρισης Ενέργειας με έμφαση στην Ναυτιλία. Η απανθρακοποίηση του πλανήτη θεωρείται απαραίτητη καθώς η θερμοκρασία του πλανήτη αυξάνεται με ραγδαίο ρυθμό κάτι που έχει αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον αλλά και στον άνθρωπο. Παρουσιάζεται η Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον ορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και τους κανονισμούς και νομοθεσίες που έχουν εφαρμοστεί σε παγκόσμιο, τοπικό και σε ναυτιλιακό επίπεδο από τις αρμόδιες αρχές και οργανισμούς με σκοπό την απανθρακοποίηση του πλανήτη. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνολογικές λύσεις και καινοτομίες που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην μείωση των εκπομπών στην βιομηχανία αλλά και στην Ναυτιλία είτε με την χρήση εναλλακτικών καυσίμων, είτε με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε με την χρήση άλλων τεχνολογιών. Επιπλέον αναλύονται οι τεχνολογίες που θεωρούνται υποσχόμενες και θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν την χρήση συμβατικών καυσίμων που είναι βασισμένα στον άνθρακα (πετρέλαιο, βενζίνη). Στο τέλος αναλύονται δύο μελέτες περίπτωσης (Case Studies), στις οποίες έχουν εφαρμοστεί κάποιες από τις παρουσιαζόμενες τεχνολογίες σε δύο υπάρχοντα πλοία τύπου τάνκερ, με σκοπό την βελτίωση του περιβαλλοντικού τους προφίλ και την μείωση του CO<sub>2</sub> που εκπέμπουν. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των δύο μελετών περίπτωσης (Case Studies).

## Περίληψη

Καθώς οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), συνεχίζουν να αυξάνονται από τις δραστηριότητες της βιομηχανίας και της ναυτιλίας, παρατηρούνται αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ο βασικός στόχος είναι η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στη βιομηχανία και τη ναυτιλία μέσω της εφαρμογής βιώσιμων τεχνολογιών και πρακτικών.

Η Συμφωνία του Παρισιού που διαπραγματεύτηκε από 196 μέλη κράτη στην Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών στο Παρίσι από τις 30 Νοεμβρίου έως τις 12 Δεκεμβρίου 2015 έθεσε σαν στόχο να μειώσει τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για να περιορίσει την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας αυτόν τον αιώνα κάτω των 2 βαθμών Κελσίου συγκριτικά με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Αντίστοιχα η Ευρωπαϊκή Ένωση το 2020 ενέκρινε την Πράσινη συμφωνία (Green Deal) στην οποία έθεσε σαν στόχο τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030 και να γίνουν κλιματικά ουδέτερα έως το 2050. Βασίζόμενος στις παραπάνω συμφωνίες και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO), υπεύθυνος οργανισμός του ΟΗΕ για το security/safety της ναυτιλίας και την πρόληψη της ατμοσφαιρικής και θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία, έθεσε τους δικούς του στόχους και πρωτοβουλίες. Οι στόχοι που έθεσε είναι η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μεταφορικό έργο (ένταση άνθρακα), ως μέσος όρος, κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, συνεχίζοντας τις προσπάθειες προς 70% έως το 2050, σε σύγκριση με το 2008, καθώς και η μείωση τουλάχιστον 50% έως το 2050 (σε σύγκριση με το 2008) των συνολικών ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι πρέπει να εφαρμοστούν κάποιες τεχνολογικές λύσεις. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων αποτελεί μια από τις πιο ελπιδοφόρες λύσεις καθώς ήδη εφαρμόζεται αρκετά χρόνια και υπάρχει αρκετά μεγάλη τεχνογνωσία. Το υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα μειώνει κατά 20-30% τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, επιπλέον έχει χαμηλό κόστος, βελτιωμένη ασφάλεια και διευρυμένη υποδομή παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς. Το Υδρογόνο σαν καύσιμο έχει μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub> και μπορεί να παραχθεί με διάφορους τρόπους (Ηλεκτρόλυση, Ατμόλυση, Βιολογική Παραγωγή, Παραγωγή από Ορυκτά Καύσιμα) που κάποιοι από αυτούς δεν παράγουν καθόλου εκπομπές CO<sub>2</sub>. Ένα από τα μειονεκτήματα που έχει το Υδρογόνο είναι ότι θεωρείται εύφλεκτο και εκρηκτικό αέριο, που σημαίνει ότι η αποθήκευση και η μεταφορά του πρέπει να γίνουν με προσοχή. Η μεθανόλη είναι ένα καύσιμο που έχει χαμηλές εκπομπές CO<sub>2</sub> και χρησιμοποιείται προς το παρόν σε κινητήρες διπλού καυσίμου. Προβλέπεται ότι τα επόμενα χρόνια οι κατασκευαστές θα παράγουν κινητήρες που θα έχουν ως κύριο καύσιμο την μεθανόλη. Το καύσιμο αυτό έχει μεγάλη ενεργειακή απόδοση, οι κινητήρες που το χρησιμοποιούν

προκαλούν μικρότερη θορυβορύπανση και βοηθάει στην συμμόρφωση με τους κανονισμούς καθώς συμβάλει στην μείωση των εκπομπών GHG. Τέλος η αμμωνία είναι ένα καύσιμο μηδενικών εκπομπών CO<sub>2</sub> και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) ή σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή έργου. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι ότι τα καυσάερια των ΜΕΚ που χρησιμοποιούν αμμωνία μπορεί να είναι τοξικά και επικίνδυνα (NO<sub>x</sub>). Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνεται χρήση συστήματος Scrubber που θα εξαλείφει τα τοξικά και επικίνδυνα αέρια.

Τα Βιοκαύσιμα είναι καύσιμα που παράγονται από οργανικά υλικά, συνήθως από βιομάζα ή άλλες βιολογικές πηγές. Είναι ευέλικτα εναλλακτικά καύσιμα, καθώς μπορούν να αναμειχθούν με συμβατικά καύσιμα ή να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τεχνικές τροποποιήσεις. Υπάρχουν διάφοροι τύποι βιοκαυσίμων (Βιοντίζελ, Βιοαιθανόλη, Βιομεθανόλη, Βιοκετόνη, Βιούδα). Η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) εξαρτάται από την πηγή και τη διαδικασία παραγωγής των βιοκαυσίμων, επομένως κάθε τύπος βιοκαυσίμου μπορεί να έχει διαφορετικό αποτύπωμα εκπομπής CO<sub>2</sub>. Το μεγάλο μειονέκτημα που έχουν τα βιοκαύσιμα είναι ότι δεν πρέπει να μένουν αποθηκευμένα για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς μπορεί να προκληθεί οξείδωση, υδρόλυση ή βιοτροποποίηση οι οποίες υποβαθμίζουν τις ιδιότητες των καυσίμων. Τα οφέλη που έχουν τα βιοκαύσιμα είναι ότι συμβάλουν στην μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και στην προστασία των θαλάσσιων Οικοσυστημάτων.

Εκτός από τα εναλλακτικά καύσιμα, και άλλες τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν στην απανθρακοποίηση του πλανήτη. Μια Κυψέλη Καυσίμου είναι ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο που αποτελείται από μία άνοδο, μία κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη. Μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου (π.χ. Υδρογόνο, μεθανόλη) και το οξυγόνο σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Μόνο ένα πολύ μικρό ηλεκτρικό δυναμικό, περίπου 0,7 βολτ (V), παράγεται από μία μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου. Ως εκ τούτου, οι κυψέλες τοποθετούνται σε σειρά για να δημιουργήσουν επαρκή τάση. Τα πλεονεκτήματα που έχουν οι κυψέλες καυσίμου είναι ότι παράγουν χαμηλό θόρυβο και δόνηση, έχουν μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub> και υψηλή απόδοση σε χαμηλή ισχύ. Ωστόσο, έχουν προς το παρόν χαμηλή διάρκεια ζωής, παρουσιάζουν μεγάλη καθυστέρηση σε ξαφνικές αλλαγές φορτίου (ανάλογα τον τύπο κυψέλης καυσίμου) και τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται δεν είναι ακόμα διαδεδομένα στην αγορά (Καθαρό Υδρογόνο).

Επιπλέον και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν ως μια αξιόπιστη και ικανή λύση που θα βοηθήσει. Ο άνεμος είναι μια άμεσα διαθέσιμη, αν και μεταβαλλόμενη, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας πάνω στην οποία υπάρχει μακρόχρονη εμπειρία. Η αρχή λειτουργίας της αιολικής ενέργειας στην ξηρά και στη θάλασσα είναι σχεδόν η ίδια με τη χρήση μιας μεθόδου που χρησιμοποιεί τη βασική δύναμη ανύψωσης ή έλξης. Οι δύο κύριοι τρόποι εφαρμογής της αιολικής ενέργειας στη ναυτιλιακή βιομηχανία σήμερα είναι η υποβοηθούμενη από τον άνεμο πρόωση πλοίου (WASP) και η εκμετάλλευση της Αιολικής Ενέργειας για χρήση ως ηλεκτρικού ρεύματος για τις ζητήσεις του πλοίου. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση της αιολικής ενέργειας είναι ότι η δύναμη του ανέμου παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις και υπάρχει δυσκολία στην αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού του. Επιπλέον υπάρχει υψηλό κόστος εγκατάστασης και συνήθως τα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας έχουν μεγάλο βάρος. Το σύστημα μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίζεται σε ενεργητικές και παθητικές τεχνολογίες. Οι ενεργητικές τεχνολογίες χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά και μηχανικά συστήματα για τη συγκέντρωση, τη μετατροπή και τη διανομή της ηλιακής ενέργειας όπως είναι τα Φωτοβολταϊκά Πάνελ. Οι Παθητικές βασίζονται σε φυσικά χαρακτηριστικά και υλικά που απορροφούν και αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια. Τέτοια συστήματα είναι οι ηλιακοί θερμαντές και οι παθητικοί ηλιακοί συλλέκτες. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν επικουρικά μειώνοντας την απαίτηση παραγωγής ενέργειας από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής κατανάλωσης συμβατικών καυσίμων που εκπέμπουν CO<sub>2</sub>. Τα μειονεκτήματα που υπάρχουν στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι η μεταβλητή απόδοση που έχουν τα συστήματα λόγω του ηλίου και ότι χρειάζεται μεγάλος χώρος για την εγκατάσταση.

Στην εργασία αναλύθηκαν και μελετήθηκαν δύο Case Studies στα οποία εφαρμόστηκαν κάποιες από τις διαθέσιμες τεχνολογικές λύσεις σε δύο υπάρχοντα πλοία τύπου τάνκερ. Στο πλοίο με το όνομα Invictus (45953 MT DWT) χρησιμοποιήθηκε η λύση της MAN Energy Solution που μετατρέπει την κύρια μηχανή συμβατικού καυσίμου, σε κινητήρα χρήσης LNG. Επιπλέον τοποθετήθηκε το ολοκληρωμένο σύστημα MAN LH2 Marine Power Pack κυψελών καυσίμου ικανό να παράγει 3.0 MWe για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις απαιτήσεις του πλοίου προκειμένου να μην λειτουργούν οι ηλεκτρογεννήτριες. Η συνολική μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> που επιτεύχθηκε είναι της τάξης του 25%. Στην συνέχεια στο πλοίο με το όνομα Prosperous (121449 MT DWT) χρησιμοποιήθηκαν τα πανιά WindWings που αποτελούν μια λύση της εταιρείας Yara Marine ως υποβοήθηση στην κύρια πρόωση. Επιπλέον τοποθετήθηκαν ηλιακά πάνελ της εταιρείας Eco Marine Power για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις απαιτήσεις του πλοίου προκειμένου να μην λειτουργούν οι ηλεκτρογεννήτριες. Η συνολική μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> που επιτεύχθηκε είναι της τάξης του 30%.

Η μείωση των καταναλώσεων και των εκπομπών CO<sub>2</sub> φαίνονται αρκετά μικρές συγκριτικά με το μέγεθος των συστημάτων που εγκαταστάθηκαν. Την μεγαλύτερη επίδραση στις εκπομπές και στις καταναλώσεις έχει η Κύρια Μηχανή του πλοίου που χρησιμοποιείται για την πρόωση του. Η βελτίωση υπαρχόντων πλοίων δεν είναι καθόλου εύκολη ακόμα, παρά τη μεγάλη ποικιλία λύσεων που υπάρχουν στην αγορά. Πριν γίνει μια εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να γίνει μελέτη σκοπιμότητας, και εκτίμηση της δαπάνης κεφαλαίου CAPEX και των λειτουργικών εξόδων OPEX. Γίνεται κατανοητό ότι η απανθρακοποίηση δεν είναι μόνο μια αναγκαιότητα για την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και μια ευκαιρία για τη βιομηχανία να εξελιχθεί και να προσφέρει βιώσιμες λύσεις για το μέλλον.

***POST-GRADUATE THESIS:***      **« Decarbonization Of Energy Production and Management with Focus on the Shipping Industry»**

***STUDENT:***   **Stefanos Gouletas**

***SUPERVISOR:***                                   **John Prousalidis, Professor, School of Naval Architecture and Marine Engineering**

***ACADEMIC YEAR:***                           **2021-2023**

## **Abstract**

During the present Diploma Thesis, the decarbonization of Energy Production and Management has been analyzed with an emphasis on the Shipping Industry. The decarbonization of the planet is considered necessary as the temperature of the planet is increasing at a rapid rate which has negative consequences for the environment and for humanity. A Literature review is presented for the definition of the greenhouse effect and the existing regulations and legislations that have been implemented at the global, local, and maritime level by the competent authorities and organizations in order to decarbonize the planet. In addition, the technological solutions and innovations that could help to reduce the emissions in industry and in Shipping are presented, either by using alternative fuels, or by using renewable energy sources, or by using other technologies. The technologies that are considered promising and could replace the use of conventional fuels that are based on carbon (petroleum, gasoline) are analyzed. At the end, two case studies are presented, in which some of the studied technologies have been applied to two existing tanker-type ships, with the aim of improving their environmental profile and reducing the CO<sub>2</sub> that they emit. At the end of the work, the results and conclusions obtained from the study of the two case studies are presented.

## **Summary**

As greenhouse gas emissions, mainly carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), continue to increase from industry and shipping companies, negative consequences for the environment and human health are being observed. The main objective is to reduce CO<sub>2</sub> emissions in industry and shipping through the use of sustainable technologies and practices.

The Paris Agreement negotiated by 196 member states at the United Nations Conference in Paris from November 30 to December 12, 2015, set the goal of reducing global greenhouse gas emissions to limit global warming this century below 2 degrees Celsius compared to pre-industrial levels. Accordingly, in 2020 the European Union approved the Green Deal in which the members of the European Union set a goal to reduce greenhouse gas emissions by 55% by 2030 and become climate neutral by 2050. Based on the above agreements, the International Maritime Organization (IMO), the UN agency responsible for the security/safety of shipping and the prevention of atmospheric and marine pollution from ships, set its own goals and initiatives. IMO set as goals to reduce CO<sub>2</sub> emissions per transport work (carbon intensity), on average, by at least 40% by 2030, continuing efforts towards 70% by 2050, compared to 2008, as well as reducing at least 50% by 2050 (compared to 2008) of total annual greenhouse gas emissions.

In order to achieve the above objectives, some technological solutions must be implemented. The use of alternative fuels is one of the most promising solutions as it has already been applied for several years and there is considerable know-how. Liquefied Natural Gas (LNG) compared to conventional fuels reduces CO<sub>2</sub> emissions by 20-30%, in addition it has low costs, improved safety and expanded production, storage and transportation infrastructure. Hydrogen is a fuel with zero CO<sub>2</sub> emissions and can be produced in various ways (Electrolysis, Vaporization, Biological Production, Production from Fossil Fuels) some of which do not produce any CO<sub>2</sub> emissions. One of the disadvantages of Hydrogen is that it is considered as a flammable and explosive gas, which means that it must be stored and transported with care. Methanol is a fuel that has low CO<sub>2</sub> emissions and is currently used in dual fuel engines. It is predicted that in the upcoming years manufacturers will produce engines that will have methanol as their main fuel. This fuel is energy efficient, the engines using it produce less noise pollution and it helps to comply with regulations by helping to reduce GHG emissions. Finally, ammonia is a zero CO<sub>2</sub> emission fuel and can be used as a fuel in internal combustion engines or in fuel cells for work production. The biggest disadvantage is that the exhaust gases of the internal combustion engines using ammonia can be toxic and dangerous (NOx). For this reason, a scrubber system must be used to eliminate toxic and dangerous gases.

Biofuels are fuels produced from organic materials, usually from biomass or other biological sources. They are flexible alternative fuels, as they can be mixed with conventional fuels or used as fuel in existing installations without

requiring significant technical modifications. There are different types of biofuels (Biodiesel, Bioethanol, Biomethanol, Biobutanol, Biogas). Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) production depends on the source and production process of biofuels, so each type of biofuel can have a different CO<sub>2</sub> emission footprint. The major disadvantage of biofuels is that they should not be stored for a long time as oxidation, hydrolysis or biomodification can occur which degrades the properties of the fuels. The benefits of biofuels are that they contribute to the reduction of greenhouse gas emissions and the protection of marine ecosystems.

In addition to alternative fuels, other technologies can contribute to the decarbonization of the planet. A Fuel Cell is an electrochemical cell consisting of an anode, a cathode and an electrolyte. It converts the chemical energy of a fuel (e.g., hydrogen, methanol) and oxygen into electrical energy through a redox reaction. Only a very small electrical potential, about 0.7 volts (V), is produced by a single fuel cell. Therefore, the cells are placed in series to generate sufficient voltage. The advantages of fuel cells are that they produce low noise and vibration, have zero CO<sub>2</sub> emissions and high efficiency at low power. However, they currently have a short lifetime, show a long delay in sudden load changes (depending on the type of fuel cell) and the fuel used is not yet widespread in the market (Pure Hydrogen).

In addition, renewable energy sources can be considered as a reliable and capable solution that will help. Wind is a readily available, albeit variable, renewable energy source with a long history of experience. The working principle of onshore and offshore wind power is almost the same using a method that uses the basic lift or drag force. The two main applications of wind energy in the marine industry today are wind-assisted ship propulsion (WASP) and the exploitation of wind energy for use as electricity for the ship's demands. The disadvantages presented by the use of wind energy are that the force of the wind shows several fluctuations and there is difficulty in exploiting its full potential. In addition, there is a high installation cost and usually wind energy exploitation systems have a large weight. The solar energy conversion system is divided into active and passive technologies. Active technologies use electronic and mechanical systems to collect, convert and distribute solar energy such as Photovoltaic Panels. Passives are based on physical features and materials that absorb and store solar energy. Such systems are solar heaters and passive solar collectors. These systems work adjunctively by reducing the demand for energy production from conventional CO<sub>2</sub> emitting conventional fuel consumption power plants. The disadvantages that exist in the exploitation of solar energy are the variable performance of solar systems and the need for a large space for installation.

In the present Diploma Thesis, two Case Studies were analyzed and studied in which some of the available technological solutions were applied on two existing tanker type ships. On the ship named *Invictus* (45953 MT DWT) MAN Energy Solution was used, which converts the conventional fuel main engine into an LNG engine. In addition, the integrated MAN LH2 Marine Power Pack fuel cell system capable of producing 3.0 MWe used in order to generate the required energy and not operate the ship's generator. The total reduction of CO<sub>2</sub> emissions achieved is 25%. Then on the ship named *Prosperous* (121449 MT DWT) the WindWings sails which are a solution of the Yara Marine company were used as an aid to the main propulsion. In addition, solar panels from the company Eco Marine Power were installed to produce electricity that will be used to cover the ship's requirements so that the generators do not work. The total reduction in CO<sub>2</sub> emissions achieved is 30%.

The reductions in consumption and CO<sub>2</sub> emissions seem quite small compared to the size of the systems installed. The main engine of the ship used for its propulsion has the greatest effect on emissions and consumption. Improving existing ships is not at all easy yet, despite the wide variety of solutions available on the market. Before the installation of such a system, a feasibility study should be carried out, and an estimation of the capital expenditure CAPEX and the operating expenses OPEX. It is understood that decarbonization is not only a necessity to protect the environment, but also an opportunity for industry to evolve and provide sustainable solutions for the future.

## 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανθρακοποίηση στη βιομηχανία και στη ναυτιλία αντιπροσωπεύει ένα από τα πλέον επείγοντα και σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας σήμερα. Καθώς οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), συνεχίζουν να αυξάνονται από τις δραστηριότητες της βιομηχανίας και της ναυτιλίας, παρατηρούνται αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Αυτό το πρόβλημα απαιτεί επείγουσα δράση και καινοτόμες λύσεις. Η αυξανόμενη ανθρακοποίηση έχει σοβαρές επιπτώσεις στο κλίμα, περιλαμβανομένων των ακραίων καιρικών φαινομένων, της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη και της αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Οι εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων στην βιομηχανία και τη ναυτιλία προκαλούν ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία έχει αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, περιλαμβανομένων αναπνευστικών προβλημάτων και ασθενειών. Η εξάντληση των φυσικών πόρων, όπως του πετρελαίου, που χρησιμοποιούνται στην καύση καυσίμων στην ναυτιλία, απειλεί την βιωσιμότητα των πηγών ενέργειας. Η πολυπλοκότητα των διεθνών κανονισμών και η ανάγκη για συμμόρφωση μπορεί να αποτελέσουν πρόκληση για τη βιομηχανία και τη ναυτιλία.

Ο βασικός στόχος είναι η μείωση της ανθρακοποίησης στη βιομηχανία και τη ναυτιλία μέσω της εφαρμογής βιώσιμων τεχνολογιών και πρακτικών. Η ανάπτυξη και η επένδυση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τη χρήση καθαρών καυσίμων, και την ανάπτυξη αποδοτικών μεταφορικών λύσεων είναι μερικά από τα μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν. Επιπλέον, η ενίσχυση της ευαισθητοποίησης και η προώθηση της νομοθεσίας που προωθεί την αειφορία αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.

Η απανθρακοποίηση στη βιομηχανία και τη ναυτιλία δεν είναι μόνο αναγκαία για τη διατήρηση του περιβάλλοντος, αλλά και για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και τη διασφάλιση μιας βιώσιμης οικονομικής μελλοντικότητας.

### 3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

#### 3.1. Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

##### Περιγραφή

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι η άνοδος της θερμοκρασίας που βιώνει η Γη επειδή ορισμένα αέρια στην ατμόσφαιρα (υδροατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, υποξείδιο του αζώτου, όζον, μεθάνιο) παγιδεύουν την ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο. Αυτά τα αέρια ονομάζονται συνήθως αέρια του θερμοκηπίου, καθώς συμπεριφέρονται αρκετά όμοια όπως οι υαλοπίνακες σε ένα θερμοκήπιο. Τα γυάλινα πάνελ του θερμοκηπίου αφήνουν το φως να εισέλθει αλλά εμποδίζουν τη διαφυγή της θερμότητας και αυτό είναι παρόμοιο με την επίδραση που έχουν αυτά τα αέρια στη γη. Το ηλιακό φως εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της Γης, περνώντας μέσα από τα αέρια του θερμοκηπίου. Καθώς φτάνει στην επιφάνεια της Γης, η γη, το νερό και η βιόσφαιρα απορροφούν την ενέργεια του ηλιακού φωτός. Μόλις απορροφηθεί, αυτή η ενέργεια αποστέλλεται πίσω στην ατμόσφαιρα. Μέρος της ενέργειας περνά πίσω στο διάστημα, αλλά μεγάλο μέρος της παραμένει παγιδευμένο στην ατμόσφαιρα από τα αέρια του θερμοκηπίου. Αυτή είναι η εντελώς φυσική διαδικασία και χωρίς αυτά τα αέρια όλη η θερμότητα θα διέφευγε πίσω στο διάστημα και η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν περίπου 30 βαθμούς Κελσίου (54 βαθμούς Φαρενάιτ) ψυχρότερη. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι πολύ σημαντική διαδικασία, γιατί χωρίς το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η Γη δεν θα ήταν αρκετά ζεστή για να ζήσουν οι άνθρωποι. Αλλά αν το φαινόμενο του θερμοκηπίου γίνει ισχυρότερο, θα μπορούσε να κάνει τη Γη πιο ζεστή από το συνηθισμένο. Ακόμη και μια μικρή επιπλέον θέρμανση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στους ανθρώπους, τα φυτά και τα ζώα. [1]

Ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες παράγουν επίσης αέρια θερμοκηπίου και αυτά τα αέρια αυξάνονται συνεχώς στην ατμόσφαιρα. Η αλλαγή στην ισορροπία των αερίων του θερμοκηπίου έχει σημαντικές επιπτώσεις σε ολόκληρο τον πλανήτη. Η καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα καθώς επίσης και το κόψιμο και το κάψιμο των δέντρων επίσης παράγει πολύ διοξείδιο του άνθρακα. Μια ομάδα αερίων του θερμοκηπίου που ονομάζονται χλωροφθοράνθρακες χρησιμοποιούνται σε αερολύματα, όπως δοχεία με σπρέι μαλλιών, ψυγεία και στην κατασκευή αφρωδών πλαστικών. Δεδομένου ότι υπάρχουν όλο και περισσότερα αέρια θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, παγιδεύεται περισσότερη θερμότητα, γεγονός που κάνει τη Γη πιο ζεστή. Αυτό είναι γνωστό ως υπερθέρμανση του πλανήτη. Πολλοί επιστήμονες συμφωνούν ότι οι δραστηριότητες του ανθρώπου ενισχύουν το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εάν συνεχίσετε να μολύνετε η ατμόσφαιρα με αέρια θερμοκηπίου, θα έχει πολύ επικίνδυνες επιπτώσεις στη Γη. Σήμερα, η αύξηση της θερμοκρασίας της Γης αυξάνεται με πρωτοφανή ταχύτητα. Κατά τη διάρκεια ολόκληρου του 20ου αιώνα, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία αυξήθηκε κατά περίπου 0,6 βαθμούς Κελσίου (λίγο περισσότερο από 1 βαθμό Φαρενάιτ). Χρησιμοποιώντας υπολογιστικά μοντέλα κλιματικών μοντέλων, οι επιστήμονες εκτιμούν ότι μέχρι το έτος 2100 η μέση παγκόσμια θερμοκρασία θα αυξηθεί κατά 1,4 έως 5,8 βαθμούς Κελσίου (περίπου 2,5 βαθμούς έως 10,5 βαθμούς Φαρενάιτ). [1]





*Εικόνα 3.1: Φαινόμενο του Θερμοκηπίου*

Πολλά αέρια του θερμοκηπίου εμφανίζονται φυσικά στο περιβάλλον, όπως οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου και το όζον. Άλλοι, όπως οι υδροφθοράνθρακες (HFCs), οι υπερφθοράνθρακες (PFCs) και το εξαφθοριούχο θείο (SF<sub>6</sub>) δημιουργούνται και εκπέμπονται αποκλειστικά μέσω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Επιπλέον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες προστίθενται επίσης σημαντικά στο επίπεδο των φυσικών αερίων του θερμοκηπίου. Τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι [2]:

- **Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>):** Το διοξείδιο του άνθρακα εισέρχεται στην ατμόσφαιρα μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, φυσικό αέριο και άνθρακα), στερεών αποβλήτων, δέντρων και προϊόντων ξύλου, καθώς και ως αποτέλεσμα άλλων χημικών αντιδράσεων (π.χ. τσιμέντο). Το διοξείδιο του άνθρακα αφαιρείται επίσης από την ατμόσφαιρα (ή «απομονώνεται») όταν απορροφάτε από τα φυτά ως μέρος του βιολογικού κύκλου του άνθρακα.
- **Οξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O):** Το οξείδιο του αζώτου εκπέμπεται κατά τη διάρκεια διαφόρων γεωργικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων, καθώς και κατά την καύση ορυκτών καυσίμων και στερεών αποβλήτων.
- **Μεθάνιο (CH<sub>4</sub>):** Το μεθάνιο εκπέμπεται κατά την παραγωγή και μεταφορά άνθρακα, φυσικού αερίου και πετρελαίου. Το μεθάνιο εκπέμπεται επίσης όταν τα οργανικά απόβλητα αποσυντίθενται, είτε σε χώρους υγειονομικής ταφής είτε σε σχέση με την κτηνοτροφία.
- **Φθοριωμένα αέρια:** Οι υδροφθοράνθρακες, οι υπερφθοράνθρακες και το εξαφθοριούχο θείο είναι συνθετικά, ισχυρά αέρια θερμοκηπίου που εκπέμπονται από μια ποικιλία βιομηχανικών διεργασιών. Τα φθοριούχα αέρια μερικές φορές χρησιμοποιούνται ως υποκατάστατα ουσιών που καταστρέφουν το όζον (δηλαδή, CFC, HCFC και halons). Αυτά τα αέρια εκπέμπονται συνήθως σε μικρότερες ποσότητες, αλλά επειδή είναι ισχυρά αέρια θερμοκηπίου, μερικές φορές αναφέρονται ως αέρια υψηλού δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη ("αέρια υψηλού GWP").

Με περισσότερη θερμότητα παγιδευμένη στη Γη, ο πλανήτης θα γίνει θερμότερος, πράγμα που σημαίνει ότι ο καιρός σε όλη τη Γη θα αλλάξει. Δεδομένου ότι οι συνθήκες που υπάρχουν στην γη είναι ιδανικές για την ύπαρξη της ζωής, μια μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας θα μπορούσε να είναι καταστροφική για τους ανθρώπους και για οποιοδήποτε άλλο ζωντανό πλάσμα στη Γη. Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στη Γη αλλάζει τις συνθήκες διαβίωσης στον πλανήτη.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες συνέπειες του φαινομένου του Θερμοκηπίου [2]:

- **Απόψυξη παγετώνων**

Η υποχώρηση των παγετώνων έχει επίσης τις δικές της συνέπειες: μειωμένο albedo (το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που αντανακλά ή επιστρέφει η επιφάνεια της γης στην ατμόσφαιρα), μια παγκόσμια άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η απελευθέρωση μεγάλων στηλών μεθανίου είναι μόνο μερικές από αυτές, ωστόσο, είναι όλα δραματικά για τον πλανήτη.

- **Πλημμύρες νησιών και παραθαλάσσιων πόλεων**

Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2014), κατά την περίοδο 1901-2010 η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας αυξήθηκε κατά 19 εκατοστά. Υπολογίζεται ότι μέχρι το 2100 η στάθμη της θάλασσας θα είναι μεταξύ 15 και 90 εκατοστών υψηλότερη από ό,τι είναι τώρα και θα απειλήσει 92 εκατομμύρια ανθρώπους. Αυτό αντικατοπτρίζεται στις εκθέσεις της NASA που δείχνουν ότι τον τελευταίο χρόνο, η μέση παγκόσμια στάθμη της θάλασσας αυξήθηκε κατά 0,27 εκατοστά.

- **Οι τυφώνες θα είναι πιο καταστροφικοί**

Η εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου δεν προκαλεί αυτά τα ακραία κλιματικά φαινόμενα, αλλά αυξάνει την έντασή τους. Ο σχηματισμός των τυφώνων συνδέεται με τη θερμοκρασία της θάλασσας και σχηματίζονται μόνο πάνω σε νερά που έχουν θερμοκρασία τουλάχιστον 26,51 °C. Το 2022, η Μεσόγειος στην Ισπανία έφτασε τους 31 βαθμούς Κελσίου, με το 95% των ημερών να είναι θερμότερες από το συνηθισμένο.

- **Μετανάστευση ειδών**

Πολλά είδη ζώων θα αναγκαστούν να μεταναστεύσουν για να επιβιώσουν από τις αλλαγές στα κύρια κλιματικά πρότυπα που μεταβάλλονται από την προοδευτική αύξηση των θερμοκρασιών. Οι τελευταίες μελέτες στον Καναδά επιβεβαίωσαν ότι το 66% των αποδημητικών πτηνών έχουν φτάσει πριν ξεκινήσει το πρώτο και πέταξαν αργότερα από το συνηθισμένο. Αυτό οφείλεται στους ολοένα και μικρότερους χειμώνες. Τα ανθρώπινα όντα θα πρέπει επίσης να μετακινηθούν: σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα, μέχρι το 2050 ο αριθμός των ανθρώπων που αναγκάζονται να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους λόγω ακραίων ξηρασιών ή βίαιων πλημμυρών μπορεί να φτάσει τα 140 εκατομμύρια.

- **Ερημοποίηση εύφορων περιοχών**

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει βαθιές επιπτώσεις στις διαδικασίες υποβάθμισης του εδάφους και συμβάλλει στην ερημοποίηση περιοχών στον πλανήτη, φαινόμενο που καταστρέφει όλο το βιολογικό δυναμικό των πληγεισών περιοχών, μετατρέποντάς τες σε άγονη και μη παραγωγική γη. Όπως αναγνωρίζεται από τον ΟΗΕ με την ευκαιρία της Παγκόσμιας Ημέρας για την Καταπολέμηση της Ερημοποίησης το 2018, το 30% της γης έχει υποβαθμιστεί και έχει χάσει την πραγματική του αξία.

- **Επιπτώσεις στη γεωργία και την κτηνοτροφία**

Η υπερθέρμανση του πλανήτη έχει ήδη αλλάξει τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου σε μεγάλα μέρη του πλανήτη. Ομοίως, οι αλλαγές στις θερμοκρασίες και τις εποχές επηρεάζουν τον πολλαπλασιασμό των εντόμων, των επεμβατικών ζιζανίων και των ασθενειών που μπορούν να επηρεάσουν τις καλλιέργειες. Το ίδιο συμβαίνει και με την κτηνοτροφία: οι κλιματικές αλλαγές επηρεάζουν άμεσα σημαντικά είδη με πολλούς τρόπους: αναπαραγωγή, μεταβολισμό, ασθένειες κ.λπ.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου επηρεάζει επίσης άμεσα την ανθρώπινη υγεία [2]:

- **Ελλείψεις σε τρόφιμα**

Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) δηλώνει ότι η κλιματική αλλαγή εγείρει σοβαρές αμφιβολίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα τροφίμων: στην τελευταία διατή έκθεσή του για την κατάσταση των τροφίμων και της γεωργίας παγκοσμίως, προειδοποιεί ότι η μείωση της γεωργικής παραγωγής θα οδηγήσει σε ελλείψεις τροφίμων. επηρεάζουν περισσότερο την υποσαχάρια Αφρική και τη Νότια Ασία.

- **Η εξάπλωση ασθενειών και πανδημιών**

Εκτός από τα προβλήματα που προέρχονται άμεσα από τη ρύπανση, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) δηλώνει ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη θα προκαλέσει μολυσματικές ασθένειες όπως η ελονοσία, η χολέρα ή ο δάγκειος πυρετός να εξαπλωθούν σε πολλές περισσότερες περιοχές του πλανήτη, γεγονός που σχετίζεται στενά με την ανάγκη για άνθρωποι να μεταναστεύσουν λόγω οικονομικών προβλημάτων. Από την άλλη πλευρά, η υπερβολική ζέστη θα αυξηθεί και θα επιδεινώσει τα καρδιαγγειακά και αναπνευστικά προβλήματα. Στην Ισπανία, μελέτες δείχνουν ότι έχουν ήδη καταγραφεί κρούσματα δάγκειου πυρετού και Ζίκα από αυτόχθονα είδη, αν και πάντα ήπιας φύσης. Εάν οι θερμοκρασίες συνεχίσουν να ανεβαίνουν, υπάρχει πιθανότητα να επιστρέψει μια από τις πιο τρομακτικές ασθένειες της αφρικανικής ηπείρου, η ίδια που έχει εξαλειφθεί στην Ισπανία από το 1964.

### 3.2. Συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement)

Η συμφωνία του Παρισιού διαπραγματεύτηκε από 196 μέλη κράτη στην Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή το 2015 η οποία πραγματοποιήθηκε στο προάστιο του Παρισιού, Λε Μπουρζέ από τις 30 Νοεμβρίου έως τις 12 Δεκεμβρίου 2015. Η συμφωνία του Παρισιού αποσκοπούσε να ενισχύσει και να αντικαταστήσει το Πρωτόκολλο του Κιότο (Kyoto Protocol), μια προηγούμενη διεθνή συνθήκη που αποσκοπούσε στον περιορισμό της έκλυσης αερίων του θερμοκηπίου. Η Συμφωνία είναι μια νομικά δεσμευτική διεθνής συνθήκη. Τέθηκε σε ισχύ στις 4 Νοεμβρίου 2016 και μέχρι σήμερα 194 μέλη (193 κράτη συν της Ευρωπαϊκής Ένωσης) από τα 198 της Σύμβασης Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) έχουν συμφωνήσει με την Συμφωνία του Παρισιού. Μια από τις λίγες χώρες που δεν έχουν επικυρώσει την συμφωνία είναι το Ιράν που αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους ρυπαντές παγκοσμίως [3].

Η Συμφωνία του Παρισιού θέτει μακροπρόθεσμους στόχους για να καθοδηγήσει όλα τα έθνη. Ο σκοπός της είναι να μειώσει ουσιαστικά τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για να περιορίσει την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας αυτόν τον αιώνα κάτω των 2 βαθμών Κελσίου συγκριτικά με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Ωστόσο γίνεται προσπάθεια για περιορισμό της ανόδου της θερμοκρασίας κάτω του 1.5 βαθμού Κελσίου συγκριτικά με τα προβιομηχανικά επίπεδα, καθώς αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των κινδύνων και τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον υπάρχουν στόχοι για την επανεξέταση των δεσμεύσεων των χωρών κάθε πέντε χρόνια και παροχή χρηματοδότησης στις αναπτυσσόμενες χώρες για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και την ενίσχυση της ικανότητας προσαρμογής στις κλιματικές επιπτώσεις [3].

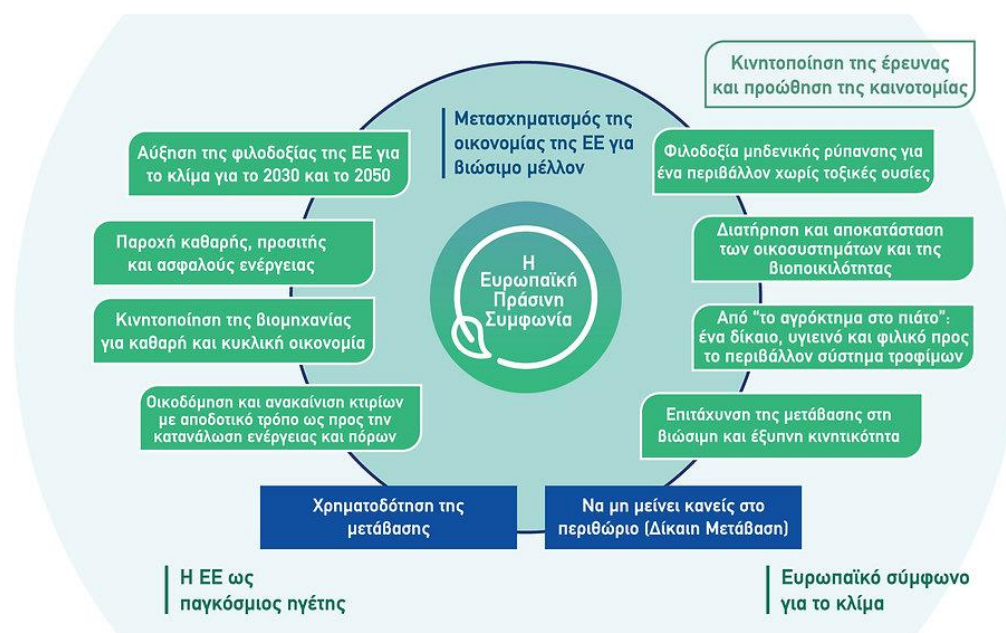
Η συμφωνία περιλαμβάνει δεσμεύσεις από όλες τις χώρες για να μειώσουν τις εκπομπές τους και να εργαστούν από κοινού για να προσαρμοστούν στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και καλεί τις χώρες να ενισχύσουν τις δεσμεύσεις τους με την πάροδο του χρόνου. Η Συμφωνία παρέχει ένα μονοπάτι για τα ανεπτυγμένα έθνη για να βοηθήσουν τα αναπτυσσόμενα έθνη στις προσπάθειες μετριασμού και προσαρμογής του κλίματος, δημιουργώντας παράλληλα ένα πλαίσιο για τη διαφανή παρακολούθηση και αναφορά των κλιματικών στόχων των χωρών.



Εικόνα 3.2: Συμφωνία του Παρισιού

### 3.3. Green Deal

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal), που εγκρίθηκε το 2020, είναι ένα σύνολο πρωτοβουλιών πολιτικής που ξεκίνησε η Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις 11 Δεκεμβρίου 2019 με στόχο να καταστήσει την Ευρώπη κλιματικά ουδέτερη έως το 2050. Η Ευρώπη πρέπει να μετατραπεί από μια οικονομία υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα, χωρίς μείωση της ευημερίας και βελτιώνοντας παράλληλα την ποιότητα ζωής των ανθρώπων, μέσω καθαρότερου νερού και αέρα, καλύτερης υγείας και ενός ακμάζοντος φυσικού κόσμου. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη αρχίσει να μετασχηματίζει και να αναβαθμίζει την οικονομία με στόχο την κλιματική ουδετερότητα. Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την κλιματική αλλαγή, που ξεκίνησε το 2020, επικεντρώνεται σε μια υπόσχεση να καταστήσει την Ευρώπη μηδενική ως προς τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπει έως το 2050 και να αποδείξει ότι οι οικονομίες θα αναπτυχθούν χωρίς αύξηση της χρήσης πόρων. Ωστόσο, η Πράσινη Συμφωνία έχει μέτρα για να διασφαλίσει ότι τα έθνη που εξαρτώνται ήδη από τα ορυκτά καύσιμα δεν θα μείνουν πίσω στη μετάβαση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η πράσινη μετάβαση αποτελεί κορυφαία προτεραιότητα για την Ευρώπη. Τα κράτη μέλη της ΕΕ θέλουν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030 και να γίνουν κλιματικά ουδέτερα έως το 2050. Κάθε υφιστάμενος νόμος πρέπει να αναθεωρηθεί όσον αφορά τα πλεονεκτήματά του για το κλίμα και θα πρέπει να εισαχθεί νέα νομοθεσία για την κυκλική οικονομία, τη βιοποικιλότητα, την ανακαίνιση κτιρίων, τη γεωργία και την καινοτομία. Φυσικά, η κλιματική ουδετερότητα θα μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με τη μείωση των εκπομπών από τη ναυτιλία [4].



Εικόνα 3.3: Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

### 3.4. IMO

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) είναι ο εξειδικευμένος οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), ο οποίος είναι υπεύθυνος για το security και το safety της ναυτιλίας και την πρόληψη της ατμοσφαιρικής και θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία. Ο IMO ρυθμίζει τη διεθνή ναυτιλία μέσω συμβάσεων που συμφωνήθηκαν και εφαρμόζονται από τα 174 κράτη μέλη του. Ενώ η υιοθέτηση ή η προσαρμογή των κανόνων του IMO είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, το αποτέλεσμα, μόλις επικυρωθεί από έναν συμφωνημένο αριθμό κρατών μελών του, θα γίνει ένα νέο παγκόσμιο πρότυπο. Το 2018 ο IMO, ευθυγραμμισμένος με τη Συμφωνία του Παρισιού, υιοθέτησε μια αρχική στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών GHG και στόχος του ήταν να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008 και να μειώσει τη μέση ένταση άνθρακα (CO<sub>2</sub> ανά ton-mile) κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030 και 70% πριν από το 2050. Αυτή η στρατηγική απαιτεί τόσο βραχυπρόθεσμα μέτρα μείωσης των εκπομπών όσο και μακροπρόθεσμα μέτρα, προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Η τέταρτη μελέτη GHG από τον IMO το 2020, έδειξε ότι οι εκπομπές αυξήθηκαν περίπου 10% μεταξύ 2012 και 2018, επειδή η δραστηριότητα ανάπτυξης της ναυτιλίας ήταν μεγαλύτερη από τα κέρδη απόδοσης. Η μελέτη σημειώνει επίσης μια απότομη αύξηση των βραχυβίων ρύπων του κλίματος, κυρίως του μεθανίου και του μαύρου άνθρακα [5].

Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει μεταφέρει ως επί το πλείστον τους κανόνες του IMO στη νομοθεσία. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Ένωση προηγείται και υιοθετεί αυστηρότερους κανονισμούς όπως η ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal) σχετικά με τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 90% έως το 2050 αντί για 50% από τον IMO.

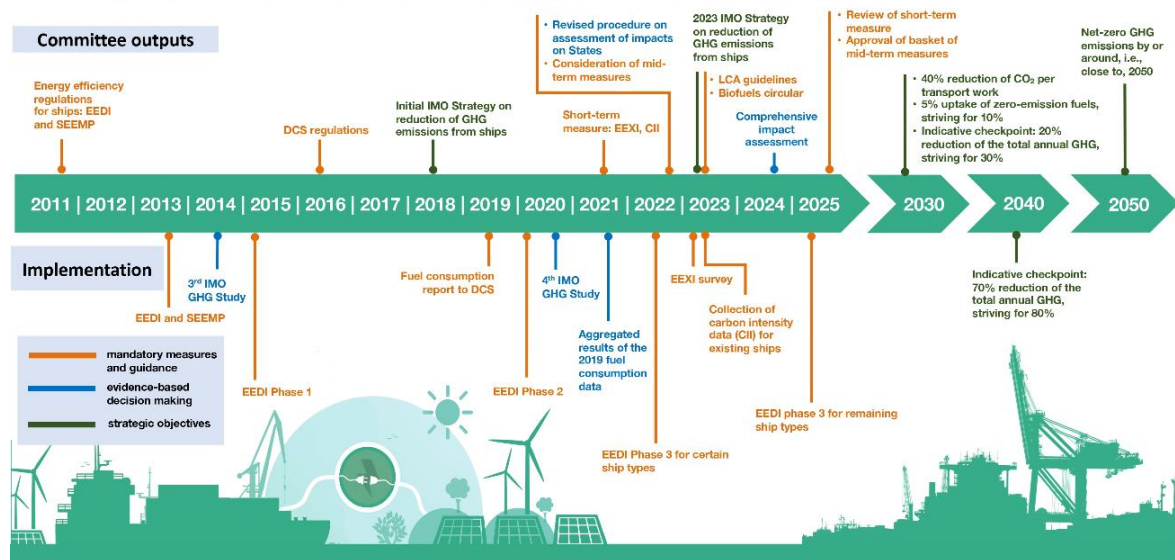
Τον Απρίλιο του 2018, ο IMO υιοθέτησε μια αρχική στρατηγική σχετικά με τη μείωση των διεθνών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) από τα πλοία, θέτοντας ένα όραμα που προέρχεται από την υποχρέωση του IMO να μειώσει τις εκπομπές GHG από τη διεθνή ναυτιλία και να τις εξαλείψει το συντομότερο δυνατό [6].

Τα επίπεδα φιλοδοξίας περιλαμβάνουν:

1. Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μεταφορικό έργο (ένταση άνθρακα), ως μέσος όρος στη διεθνή ναυτιλία, κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, συνεχίζοντας τις προσπάθειες προς 70% έως το 2050, σε σύγκριση με το 2008.
2. Μείωση τουλάχιστον 50% έως το 2050 (σε σύγκριση με το 2008) των συνολικών ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη διεθνή ναυτιλία, ενώ, ταυτόχρονα, σύμφωνα με το όραμα του IMO, η προσπάθεια εξάλειψής τους προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> που συνδέεται άμεσα με τους στόχους της συμφωνίας του Παρισιού.

## Addressing climate change

Over a decade of regulatory action to cut GHG emissions from shipping



Εικόνα 3.4: Στρατηγική του IMO

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, ο IMO έχει εφαρμόσει τα παρακάτω μέτρα που έχουν ενταχθεί στην Διεθνή Σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης (MARPOL).

### 3.4.1. EEDI

Ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI), σύμφωνα με το Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος MEPC 62 (Ιούλιος 2011) με την υιοθέτηση τροποποιήσεων στο Παράρτημα VI MARPOL (ψήφισμα MEPC.203(62)), έγινε υποχρεωτικός για τα νέα πλοία που ναυπηγήθηκαν από το 2013 και ήταν η πρώτη νόμιμη δεσμευτική συνθήκη για την αλλαγή του κλίματος που εγκρίθηκε από το Πρωτόκολλο του Κιότο [6].

Το EEDI αναπτύχθηκε για τα τμήματα του παγκόσμιου εμπορικού στόλου που είναι ο μεγαλύτερος και πιο ενεργοβόρος και αφορά εκπομπές από νέα πλοία με τον ακόλουθο τύπο πλοίου: bulk carrier, tanker, container ship, gas carrier, refrigerated cargo carrier, general cargo, και πλοίο μεταφοράς συνδυασμού. Εγκρίθηκαν τροποποιήσεις στους κανονισμούς EEDI που επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής του EEDI σε μεταφορείς LNG, φορτηγά πλοία ro-ro (οχηματαγωγά), επιβατηγά πλοία ro-ro, επιβατηγά πλοία και κρουαζιερόπλοια με μη συμβατική πρόωση, από την MEPC το 2014. Μετά από αυτές τις τροποποιήσεις, οι τύποι πλοίων που ευθύνονται για το 85% περίπου των εκπομπών CO<sub>2</sub> της διεθνούς ναυτιλίας ενσωματώνονται στο διεθνές ρυθμιστικό καθεστώς.

Το EEDI είναι το πιο σημαντικό τεχνικό μέτρο για τα νέα πλοία και στοχεύει στην προώθηση της χρήσης κινητήρων και εξοπλισμού πιο ενεργειακά αποδοτικών. Το πρότυπο έχει τη μέση απόδοση των πλοίων που ναυπηγήθηκαν μεταξύ 1999-2009 ως τη βασική γραμμή που ορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα CO<sub>2</sub> ανά μέγεθος και τύπο πλοίου για τη μεταφορά μιας μονάδας

μεταφορικού έργου (δηλαδή gCO<sub>2</sub>/τόνο μίλι). Μπορεί να εκφραστεί ως ο λόγος του «περιβαλλοντικού κόστους» διαιρούμενος με το «όφελος για την κοινωνία» και είναι συνάρτηση της εγκατεστημένης ισχύς, της ταχύτητας του σκάφους και του Μεταφερόμενου φορτίου [7].

$$\text{EEDI} = \frac{\text{Impact to environment}}{\text{Benefit for society}}$$

Με άλλα λόγια:

$$\text{EEDI} = \frac{\text{CO}_2 \text{ Emission}}{\text{Transport Work}}$$

$$\text{EEDI} = \frac{\text{Impact to environment}}{\text{Benefit to society}} = \frac{\text{Power} * \text{SFC} * \text{FC}}{\text{Deadweight} * \text{speed}}$$

Για να ενθαρρύνει τη μελλοντική αποδοτικότητα του σχεδιασμού νέων πλοίων, ο κανονισμός του IMO έχει θέσει τρεις διαφορετικούς στόχους, γνωστούς ως φάσεις, καθένας από τους οποίους απαιτεί προοδευτικά λιγότερη ενέργεια (και επομένως CO<sub>2</sub>) για την εκτέλεση του ίδιου όγκου μεταφορικών εργασιών [6].

Στόχοι EEDI για νέα πλοία:

- **Φάση 0:** η απόδοση σχεδιασμού πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη γραμμή βάσης για πλοία που ναυπηγήθηκαν μεταξύ 2013-2015.
- **Φάση 1:** η απόδοση σχεδιασμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 10% κάτω από τη γραμμή αναφοράς για πλοία που ναυπηγήθηκαν μεταξύ 2016-2020.
- **Φάση 2:** η απόδοση σχεδιασμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 20% κάτω από τη γραμμή αναφοράς για πλοία που ναυπηγήθηκαν μεταξύ 2021-2025.
- **Φάση 3:** η απόδοση σχεδιασμού πρέπει να είναι τουλάχιστον 30% κάτω από τη γραμμή αναφοράς για πλοία που ναυπηγήθηκαν μετά το 2025.



Η φιλοσοφία πίσω από το EEDI είναι ο υπολογισμός του να είναι απλός και ικανός για ευρεία εφαρμογή, και να προωθήσει τις προσπάθειες όλων των ενδιαφερομένων για μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> αντανakλώντας την αποτελεσματική διαχείριση της ενέργεια του πλοίου στην πραγματική χρήση. Διεγείρει τη συνεχή τεχνική ανάπτυξη όλων των εξαρτημάτων που επηρεάζουν το καύσιμο και την αποτελεσματική χρήση αυτού σε ένα πλοίο. Διαχωρίζει επίσης τα τεχνικά μέτρα και τα μέτρα που βασίζονται στον σχεδιασμό από τις λειτουργικές και εμπορικές διαδικασίες που μπορούν να συνδράμουν στην μείωση των εκπομπών [7].

Η μελέτη GHG που διεξήχθη από τον IMO το 2000 κατέληξε σε έναν λειτουργικό δείκτη CO<sub>2</sub>. Έγινε αποδεκτό στον IMO ότι ένας τέτοιος δείκτης θα πρέπει να αντικατοπτρίζει μόνο τις τεχνικές πτυχές όπως η βελτιστοποίηση των κινητήρων, του κύτους και της προπέλας ή η χρήση μη ορυκτών καυσίμων, και όχι τις λειτουργικές ή εμπορικές πτυχές. Αυτό οδήγησε στη βελτίωση του δείκτη. Μετά από πολύ συζήτηση στις διάφορες συνεδριάσεις της Επιτροπής Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος, η τρέχουσα εμπειρική διατύπωση έγινε αποδεκτή. Τα σκευάσματα, τα οποία συνιστώνται σε διαφορετικά στάδια, δίνονται παρακάτω [7].

$$\begin{aligned}
 & \text{Impact of Main Engines} \quad \text{Impact of auxiliary power demand} \quad \text{Impact of PTI reduced by electrical innovations} \quad \text{Reduction of impact due by innovations on main engines} \\
 & \left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*) + \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{nEff} f_{Eff(i)} \cdot P_{AE_{Eff(i)}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} - \left( \sum_{i=1}^{nEff} f_{Eff(i)} \cdot P_{Eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right) \\
 & \underbrace{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}_{\text{Ship's work in normal operating condition}}
 \end{aligned}$$

$$EEDI = \frac{CO2 \text{ απο το σύστημα πρόωσης} + CO2 \text{ απο τα βοηθητικά συστήματα} - CO2 \text{ μείωση των εκπομπών}}{DWT \times Ταχύτητα} \quad (3.1)$$

Όπου:

**P<sub>ME</sub>**: Ισχύς της Κύριας Μηχανής (kW).

**P<sub>AE</sub>**: Ισχύς των Βοηθητικών Μηχανών (kW).

**S<sub>FC</sub>**: Ειδική κατανάλωση καυσίμου (g/kW).

**C**: Συντελεστής καυσίμου σε CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub>/ g Fuel) (κοντά στο 3).

**Capacity**: για εμπορικά πλοία ίσο με το DWT, for Passenger ships ίσο με το Gross Tonnage.

**V<sub>ref</sub>**: Ταχύτητα Αναφοράς (nm/hour);

**f<sub>i</sub>**: Συντελεστής διόρθωσης για την χωρητικότητα.

**f<sub>w</sub>**: Συντελεστής διόρθωσης για την απόδοση σε πραγματικό καιρό.

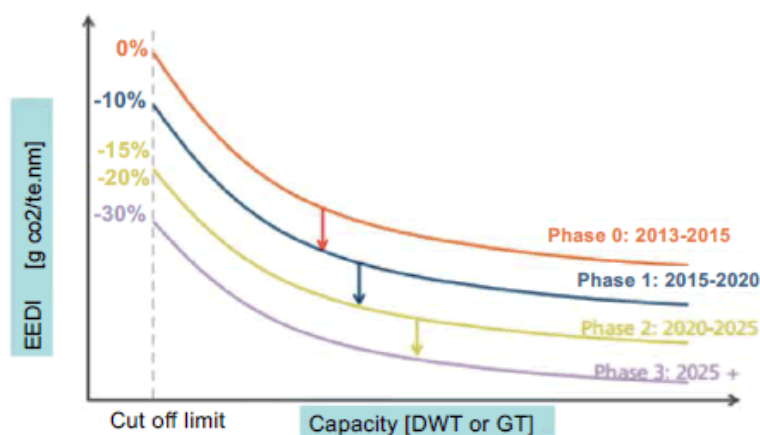
**f<sub>i</sub>**: Συντελεστής διόρθωσης για την αποδοτικότητα.

Το EEDI εκφράζει τον αντίκτυπο στο περιβάλλον από τη ναυτιλία έναντι του οφέλους για την κοινωνία από τη ναυτιλία. Η φόρμουλα EEDI λαμβάνει υπόψη ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και ανάγκες, όπως η χρήση ανάκτησης ενέργειας, η χρήση καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα, η απόδοση των πλοίων σε κύματα και η ανάγκη για ενίσχυση σε πάγο ορισμένων πλοίων. Ο χειρισμός ορισμένων σχεδιαστικών χαρακτηριστικών, όπως η ηλεκτρική πρόωση, εξακολουθεί να υπόκειται σε αξιολόγηση. Το EEDI έχει μια σταθερή τιμή που θα αλλάξει μόνο εάν αλλάξει ο σχεδιασμός. Υπάρχουν ορισμένοι τύποι πλοίων όπου το EEDI, σε μονάδες ανά ναυτικό μίλι, μπορεί να θεωρηθεί λιγότερο σημαντικό ή σχετικό. Αυτό, και η πιθανή ανάγκη για ελάχιστο όριο μεγέθους, υποδηλώνει ότι οι μονάδες στις οποίες μετράται το EEDI ενδέχεται να χρειάζονται τροποποίηση για την αντιμετώπιση ορισμένων τύπων πλοίων και μεγεθών πλοίων και ότι το EEDI μπορεί να μην είναι πρακτικά εφαρμόσιμο σε όλους τους τύπους πλοίων. Ωστόσο, τα μεγάλα εμπορικά πλοία μπορούν να καλυφθούν και τα πλοία αυτά κατέχουν σημαντικό μερίδιο των εκπομπών [6].

Υπάρχει μια γραμμή αναφοράς (Baseline) που ορίζεται ως μια καμπύλη που αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή δείκτη προσαρμοσμένη σε ένα σύνολο μεμονωμένων τιμών δείκτη για μια καθορισμένη ομάδα πλοίων. Για κάθε νέο πλοίο, ο δείκτης EEDI θα πρέπει να ισχύει το εξής:

$$Attained\ EEDI \leq Required\ EEDI = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot Baseline \quad (3.2)$$

Το ποσοστό μείωσης «X» έχει καθοριστεί ανάλογα με το έτος κατασκευής για νέα πλοία σύμφωνα με τις τέσσερις διαφορετικές φάσεις.



Εικόνα 3.5: Επίπεδο μείωσης του δείκτη EEDI

Το επίπεδο μείωσης του CO<sub>2</sub> (γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά τόνο μίλι) για την πρώτη φάση είχε οριστεί στο 10% και γίνεται αυστηρότερο κάθε πέντε χρόνια για να συμβαδίζει με τις τεχνολογικές εξελίξεις των νέων μέτρων απόδοσης και μείωσης. Τα ποσοστά μείωσης έχουν καθοριστεί μέχρι την περίοδο 2025 και μετά, όταν απαιτείται μείωση 30% για τους ισχύοντες τύπους πλοίων που υπολογίζονται από μια γραμμή αναφοράς που αντιπροσωπεύει τη μέση απόδοση για πλοία που ναυπηγήθηκαν μεταξύ 2000 και 2010 [6].

### 3.4.2. SEEMP

Ταυτόχρονα με το (EEDI), το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίων (SEEMP), με την υιοθέτηση τροποποιήσεων στο Παράρτημα VI MARPOL, έγινε υποχρεωτικό από τον Ιανουάριο του 2013 για όλα τα πλοία σύμφωνα με το MEPC 62 (Ιούλιος 2011). Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP) πρέπει να εφαρμόζεται από όλα τα πλοία άνω των 400 GT σε λειτουργία, αν και δεν περιέχει ρητές και υποχρεωτικές απαιτήσεις ως προς το περιεχόμενο και την εφαρμογή. Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP), είναι ένα έγγραφο συγκεκριμένο για το κάθε πλοίο που περιέχει μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης που προσδιορίζονται από τον πλοιοκτήτη, και πρέπει να φυλάσσονται σε κάθε πλοίο. Το σχέδιο αυτό θα πρέπει να εφαρμόζεται σύμφωνα με τον τύπο του πλοίου, τις διαδρομές του πλοίου, τα μεταφερόμενα φορτία και άλλους σχετικούς παράγοντες. Ως εκ τούτου, το SEEMP δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε επίπεδο στόλου ή εταιρείας [6].

Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP) είναι σε θέση να βελτιώσει την απόδοση του πλοίου, εφαρμόζοντας διάφορους τρόπους, όπως ο καθαρισμός του κύτους κατά όσο το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι, βελτιστοποιώντας την ταχύτητα και την αντίσταση του σκάφους, κάνοντας μια αλλαγή πορείας για την αποφυγή σκληρών καιρικών συνθηκών, με την εγκατάσταση μεθόδων ανάκτησης θερμότητας κ.λπ. Οι αναφερόμενες μέθοδοι θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην αύξηση της απόδοσης του πλοίου και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του πλοίου [8]. Επιπλέον, οι τροποποιήσεις στο Παράρτημα VI MARPOL, που εγκρίθηκαν το 2016, ζητούν από πλοία 5.000 ολικής χωρητικότητας και άνω που εκτελούν διεθνή ταξίδια να συλλέγουν και να αναφέρουν τα δεδομένα κατανάλωσης μαζούτ τους στην Αρχή ή σε Αναγνωρισμένο Οργανισμό (RO) από το έτος 2019 (IMO DCS ). Τα πλοία που υπόκεινται στο DCS του IMO απαιτείται να αναπτύξουν ένα σχέδιο συλλογής δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου πλοίων (SEEMP Part II) και το σχέδιο θα πρέπει να επιβεβαιωθεί από την Αρχή ή έναν Αναγνωρισμένο Οργανισμό (RO). Περαιτέρω τροποποιήσεις στο Παράρτημα VI MARPOL (Ψήφισμα IMO MEPC.328(76)) εγκρίθηκαν στην 76η σύνοδο της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC 76) του IMO το 2021 και η βαθμολογία CII των πλοίων εισάχθηκε από την 1η Ιανουαρίου 2023 με βάση την ετήσια κατανάλωση καυσίμου κάθε πλοίου. Τα πλοία που υπόκεινται στο σχέδιο CII πρέπει να αναπτύξουν ένα SEEMP (Part III) που θα περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- i. Μεθοδολογία υπολογισμού CII
- ii. Απαιτούμενες τιμές CII για τα επόμενα 3 χρόνια
- iii. Σχέδιο εφαρμογής για την επίτευξη του απαιτούμενου CII
- iv. Διαδικασίες για την αυτό -αξιολόγηση και βελτίωση

Το Σχέδιο αυτό θα πρέπει να εγκριθεί από τη Διοίκηση ή από έναν RO. Από το 2023, τα δεδομένα DCS του IMO θα υπόκεινται στην αξιολόγηση CII και θα δίνεται βαθμολογία (A, B, C, D ή E) σε κάθε πλοίο από το 2024. Για πλοία που έχουν βαθμολογία E σε οποιοδήποτε έτος ή D για 3 συναπτά έτη, απαιτείται η ανάπτυξη ενός σχεδίου διορθωτικής δράσης στο Μέρος III του SEEMP και το σχέδιο αυτό θα πρέπει να εγκριθεί από τη διοίκηση ή έναν Αναγνωρισμένο Οργανισμό (RO) [6].

### 3.4.3. DCS

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ) υιοθέτησε ένα υποχρεωτικό σύστημα συλλογής δεδομένων καυσίμου (DCS) για τη διεθνή ναυτιλία, απαιτώντας από τα πλοία 5.000 Gross Tonnage και άνω να αρχίσουν να συλλέγουν και να αναφέρουν δεδομένα σε μια βάση δεδομένων του ΙΜΟ από το 2019 [6].

Εγκρίθηκε από την Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος του ΙΜΟ (ΜΕΡC.278 70) στις 28 Οκτωβρίου 2016 ως τροποποιήσεις στο Κεφάλαιο 4 του Παραρτήματος VI της ΜΑΡΡΟΛ, προσθέτοντας έναν νέο Κανονισμό 22Α για τη συλλογή και αναφορά δεδομένων κατανάλωσης μαζούτ πλοίων και νέα παραρτήματα που καλύπτουν πληροφορίες που πρέπει να υποβληθούν στη βάση δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου πλοίων του ΙΜΟ. Αυτές οι τροποποιήσεις τέθηκαν σε ισχύ την 1η Μαρτίου 2018 [9].

Τα συγκεντρωτικά δεδομένα πρέπει να αναφέρονται στο κράτος σημαίας του πλοίου μετά το τέλος κάθε ημερολογιακού έτους και μετά από αυτό, το κράτος σημαίας, αφού επιβεβαιώσει ότι τα δεδομένα έχουν αναφερθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις, πρέπει να εκδώσει δήλωση συμμόρφωσης στο πλοίο. Αυτά τα δεδομένα απαιτείται να μεταφερθούν στη συνέχεια σε βάση δεδομένων κατανάλωσης καυσίμου πλοίων του ΙΜΟ από τα κράτη σημαίας. Θα πρέπει να συντάσσεται ετήσια έκθεση από τον ΙΜΟ προς το ΜΕΡC, συνοψίζοντας τα δεδομένα που συλλέγονται [9].

### 3.4.4. EEXI

Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης των υφιστάμενων πλοίων (EEXI) αποτελεί μέρος της τεχνικής προσέγγισης του ΙΜΟ για τη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης των υφιστάμενων πλοίων. Στην προσπάθεια να επιτευχθούν οι στόχοι μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και τελικά να γίνει η ναυτιλία ουδέτερη από άνθρακα. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ) ανέπτυξε αυτή τη νέα επέκταση του δείκτη σχεδίασης του EEDI για υπάρχοντα πλοία που ναυπηγήθηκαν πριν από το 2013 που λαμβάνει υπόψη μόνο τις παραμέτρους σχεδιασμού των πλοίων και όχι τους λειτουργικούς παράγοντες [6].

Ο ΙΜΟ ενέκρινε τροποποιήσεις στο Παράρτημα VI της σύμβασης ΜΑΡΡΟΛ κατά την 76η σύνοδο της Επιτροπής Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (ΜΕΡC 76) που πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2021.

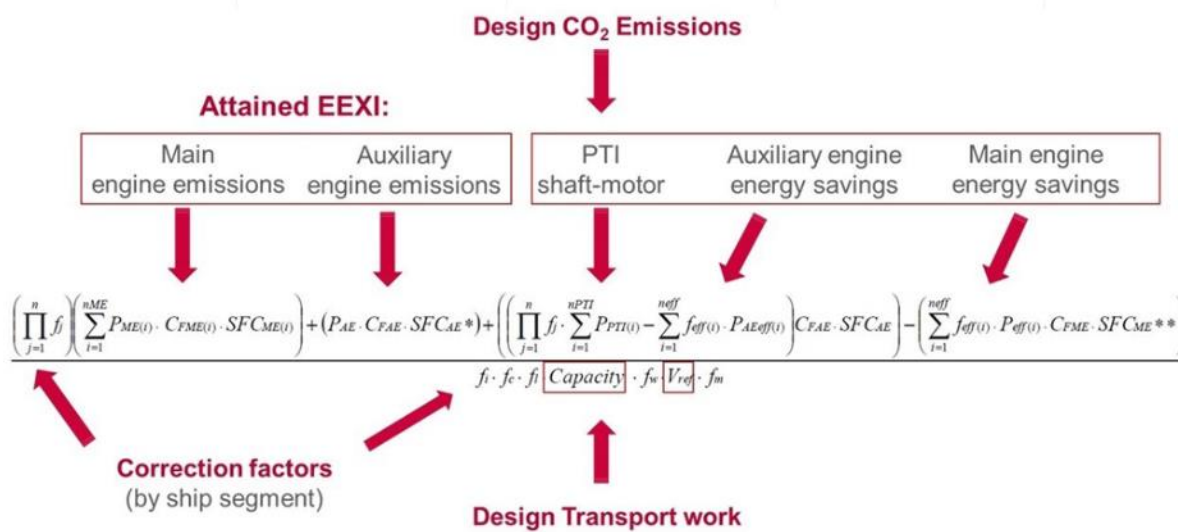
Αυτές οι τροποποιήσεις είναι σύμφωνες με τη στρατηγική του ΙΜΟ GHG για μείωση της έντασης άνθρακα της ναυτιλίας σε τουλάχιστον 40% έως το 2030 & 70% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008 και απαιτούν από τα πλοία να ενσωματώσουν μια τεχνική και επιχειρησιακή προσέγγιση για τη μείωση της έντασης του άνθρακα και του συνολικού GHG εκπομπών [6].

Το EEXI μετρά τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μεταφορικό έργο, λαμβάνοντας καθαρά υπόψη τις παραμέτρους σχεδιασμού του πλοίου. Το EEXI δεν απαιτεί καμία μέτρηση ή αναφορά πραγματικών εκπομπών CO<sub>2</sub> ενώ το πλοίο βρίσκεται σε λειτουργία. Το EEXI είναι η εξέλιξη του

EEDI, Energy Efficiency Design Index, που ισχύει από το 2013. Αυτοί οι δείκτες μετρούν το ίδιο στην πράξη. Ωστόσο, το EEDI εφαρμόζεται σε νέα πλοία ενώ το EEXI ισχύει για τα υπάρχοντα πλοία. Ο κανονισμός EEXI είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέτρα του IMO για την προώθηση πιο φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών και τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας [10].

Τα υπάρχοντα πλοία θα κληθούν να υπολογίσουν και να αξιολογήσουν τον δείκτη ενεργειακής τους απόδοσης, γνωστό ως «Attained EEXI». Για όλα τα πλοία θα πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστά ο δείκτης και να ληφθεί έγκριση για την επίτευξη του EEXI από την πρώτη ετήσια, ενδιάμεση ή ανανεωτική επιθεώρηση της κλάσης (Annual, Intermediate ή Renewal Survey) για την πρόληψη της ρύπανσης της ατμόσφαιρας (IAPP) το 2023. Στη συνέχεια, το Attained EEXI θα συγκριθεί με το Required EEXI, το οποίο είναι ένα επίπεδο απόδοσης που ορίζεται από τους κανονισμούς του IMO. Οι απαιτούμενες τιμές EEXI (Required EEXI) προσδιορίζονται με βάση τα στατιστικά στοιχεία του στόλου ανά τύπο πλοίου, την χωρητικότητα φορτίου και την μέθοδο πρόωσης [10].

Ο τύπος του EEXI είναι ο ίδιος με τον EEDI, αλλά οι ορισμοί ορισμένων παραμέτρων είναι διαφορετικοί. Παρακάτω παρουσιάζεται ο τύπος του EEXI [g/ton\*mil]:



Ο τύπος του EEXI ουσιαστικά εάν τον απλοποιήσουμε υπολογίζει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μεταφορικό έργο, λαμβάνοντας καθαρά υπόψη τις παραμέτρους σχεδιασμού του πλοίου.

### Concept formula

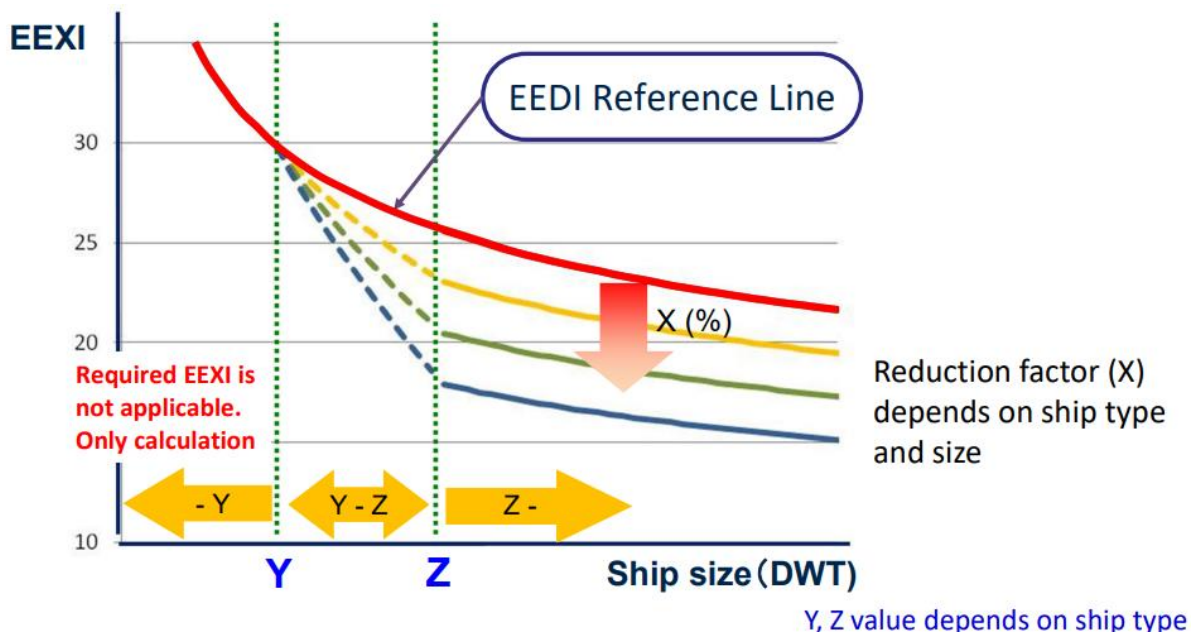
$$\text{EEXI [g/ton} \cdot \text{mile]} = \frac{\text{CO}_2 \text{ Conversion factor} \times \text{SFC [g/kW} \cdot \text{h]} \times \text{Engine Power [kW]}}{\text{Capacity [ton]} \times \text{EEXI Speed (Vref) [knot]}}$$

|   |  |
|---|--|
| <b>CO<sub>2</sub> Conversion factor (C<sub>F</sub>)</b> | Αντιστοιχεί το καύσιμο που έχει χρησιμοποιηθεί στο καύσιμο αναφοράς (βαθμός DM: 3.206) |
| <b>SFC</b>  | Κατανάλωση καυσίμου στο 75% του MCR (M/E), και στο 50% του MCR (A/E)                   |
| <b>Engine Power</b>                                     | 75% της ονομαστικής εγκατεστημένης ισχύος (MCR)  |
| <b>Capacity</b>   | Deadweight   |
| <b>EEXI Speed (V<sub>ref</sub>)</b>                     | Ταχύτητα πλοίου στο 75% MCR υπό συνθήκες βύθισης που αντιστοιχεί στη χωρητικότητα      |

Πίνακας 3.1: Επεξήγηση παραμέτρων

Ο Κανονισμός 21Α θα παρέχει την απαίτηση και τις κατευθυντήριες γραμμές για τον υπολογισμό του απαιτούμενου EEXI και την επαλήθευση ότι το EEXI που έχει επιτύχει ένα σκάφος είναι χαμηλότερο από το απαιτούμενο EEXI. Το Απαιτούμενο EEXI θα είναι το ρυθμιστικό όριο για το EEXI και ο υπολογισμός του θα είναι σύμφωνος με τις τιμές της γραμμής αναφοράς EEDI με τη χρήση συντελεστών μείωσης ειδικό για το EEXI, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου. Ιδιαίτερη προσοχή λήφθηκε από τα μέλη του ISWG-GHG κατά τον καθορισμό των παραγόντων μείωσης EEXI για την αντιμετώπιση των προκλήσεων συμμόρφωσης που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν ορισμένα παλαιότερα πλοία, διατηρώντας παράλληλα το επίπεδο φιλοδοξίας της Στρατηγικής του IMO για το 2030. Τα πλοία θα πρέπει να ικανοποιούν την παρακάτω σχέση [6].

$$\text{Attained EEXI} \leq \text{Required EEXI} = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot \text{EEDI Reference Line} \quad (3.3)$$



Εικόνα 3.6: Απαιτούμενο EEXI

Σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται η παρακάτω σχέση για ένα πλοίο θα πρέπει να εφαρμοστούν κάποιες διορθωτικές κινήσεις προκειμένου να ισχύσει:

$$\text{Attained EEXI} \leq \text{Required EEXI}.$$

Τέτοιες κινήσεις είναι η μείωση της μέγιστης ισχύς της μηχανής, η εγκατάσταση συσκευών εξοικονόμησης ενέργειας, η μετατροπή στην γάστρα ή στην προπέλα του πλοίου καθώς επίσης και άλλες λύσεις όπως συστήματα ανάκτησης θερμότητας, τεχνολογία λίπανσης αέρα, αιολική πρόωση, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα κ.λπ. [10].

Οι απαιτήσεις EEXI ισχύουν για όλα τα πλοία 400 GT και άνω τα οποία εκτελούν διεθνή ταξίδια ανεξάρτητα από την ημερομηνία παράδοσης του πλοίου, εκτός από τα ακόλουθα πλοία όπως στην περίπτωση του EEDI [6].

- Πλοία που δεν προωθούνται με μηχανικά μέσα
- Πλατφόρμες συμπεριλαμβανομένων των FPSO και των FSU και των γεωτρήσεων, ανεξάρτητα από την πρόωση τους
- Πλοία κατηγορίας Α όπως ορίζονται στον Πολικό κώδικα
- Πλοία που διαθέτουν μη συμβατική πρόωση, όπως ντίτζελ ηλεκτρική, τουρμπίνα ή υβριδικό σύστημα πρόωσης (εκτός από το μεταφορέα LNG και τα κρουαζιερόπλοια επιβατηγών)

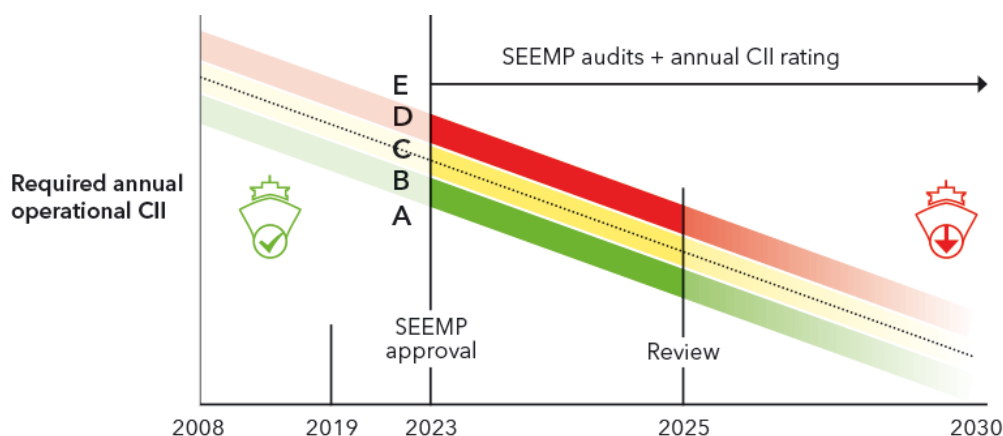
### 3.4.5. CII

Ο δείκτης έντασης άνθρακα (CII) είναι ένα μέτρο του πόσο αποτελεσματικά ένα πλοίο μεταφέρει αγαθά ή επιβάτες και δίνεται σε γραμμάρια CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται ανά μεταφορική ικανότητα και ναυτικό μίλι. Ο CII (π.χ., ο ετήσιος λόγος απόδοσης [AER] σε γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά dwt-mile) θα υπολογίζεται υποχρεωτικά για όλα τα κρουαζιερόπλοια και τα εμπορικά πλοία άνω των 5.000 GT και θα δίνεται ετήσια βαθμολογία από Α έως Ε. Προς το 2030, τα κατώτατα όρια αξιολόγησης θα είναι ολοένα και πιο αυστηρά. Για όλα τα πλοία που θα επιτύχουν βαθμολογία D για τρία διαδοχικά έτη ή βαθμολογία Ε, σε ένα μόνο έτος, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα σχέδιο διορθωτικής δράσης ως μέρος του SEEMP και να εγκριθεί. Οι τεχνικές προδιαγραφές σχετικά με τις μεθόδους υπολογισμού, τις γραμμές βάσης και τις απαιτήσεις για το πλοίο θα καθοριστούν σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές και θα οριστικοποιηθούν και θα εγκριθούν κατά τη διάρκεια του MEPC 76 [6].

Το CII καθορίζει τον ετήσιο συντελεστή μείωσης που απαιτείται για τη διασφάλιση της συνεχούς βελτίωσης της λειτουργικής έντασης άνθρακα ενός πλοίου εντός ενός συγκεκριμένου επιπέδου ικανότητας. Η πραγματική ετήσια επιχειρησιακή CII που επιτυγχάνεται πρέπει να τεκμηριώνεται και να επαληθεύεται έναντι της απαιτούμενης ετήσιας επιχειρησιακής CII. Αυτό επιτρέπει τον προσδιορισμό της λειτουργικής βαθμολογίας έντασης άνθρακα.

Με βάση το CII ενός πλοίου, η έντασή του άνθρακα θα βαθμολογηθεί A, B, C, D ή E (όπου το A είναι το καλύτερο). Η βαθμολογία υποδεικνύει ένα μείζον ανώτερο, δευτερεύον ανώτερο, μέτριο, δευτερεύον κατώτερο ή κατώτερο επίπεδο απόδοσης. Το επίπεδο απόδοσης θα καταγραφεί σε μια «Δήλωση Συμμόρφωσης» που θα αναπτυχθεί περαιτέρω στο Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP) [10].

Ένα πλοίο με βαθμολογία D για τρία συνεχόμενα έτη, ή E για ένα έτος, θα πρέπει να υποβάλει ένα σχέδιο διορθωτικών ενεργειών για να δείξει πώς θα επιτευχθεί ο απαιτούμενος δείκτης C ή παραπάνω. Οι διοικήσεις, οι λιμενικές αρχές και άλλοι ενδιαφερόμενοι, ανάλογα με την περίπτωση, ενθαρρύνονται να παρέχουν κίνητρα σε πλοία με βαθμολογία A ή B [6].



Εικόνα 3.7: Βαθμολογίες Δείκτη CII

Ένα πλοίο μπορεί να κινείται με καύσιμο χαμηλών εκπομπών άνθρακα για να έχει σαφώς υψηλότερη βαθμολογία από ένα πλοίο που λειτουργεί με ορυκτά καύσιμα, αλλά υπάρχουν πολλά πράγματα που μπορεί να κάνει ένα πλοίο για να βελτιώσει την αξιολόγησή του, για παράδειγμα μέσω μέτρων, όπως [6]:

- Καθαρισμός γάστρας για μείωση της οπισθέλκουσας.
- Βελτιστοποίηση ταχύτητας και δρομολόγησης.
- Εγκατάσταση λαμπτήρων χαμηλής ενέργειας.
- Εγκατάσταση ηλιακής/αιολικής βοηθητικής ενέργειας για υπηρεσίες διαμονής.



### 3.5. Τεχνολογικές Λύσεις

Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες θα απαιτηθεί μεγάλης κλίμακας χρήση καυσίμων ουδέτερων από άνθρακα ή/και εξοπλισμού μείωσης των καυσαερίων για την επίτευξη των νέων στόχων απανθρακοποίησης του IMO. Οι πιθανές εναλλακτικές λύσεις στα συμβατικά καύσιμα πλοίων είναι ποικίλες και δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί το προτιμώμενο. Αυτή η ενότητα παρέχει μια επισκόπηση των πιο διάσημων ή πολλά υποσχόμενων εναλλακτικών.

#### 3.5.1. Εναλλακτικά Καύσιμα

##### *Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)*

Το LNG (υγροποιημένο φυσικό αέριο) είναι ένας πόρος ενέργειας που προέρχεται από το φυσικό αέριο, το οποίο έχει μετατραπεί σε μορφή υγρού, για να διευκολυνθεί η αποθήκευση και η μεταφορά του. Το LNG παράγεται από φυσικό αέριο σε ορισμένες περιοχές του κόσμου και μεταφέρεται στις χώρες που το χρειάζονται, όπου χρησιμοποιείται ως καύσιμο για θέρμανση, ηλεκτρική ενέργεια και ως καύσιμο για τις μεταφορές. Το φυσικό αέριο έχει προκύψει ως το πιο προτιμώμενο καύσιμο λόγω της εγγενώς περιβαλλοντικής ευεργεσίας του, της μεγαλύτερης απόδοσης και της οικονομικής του αποδοτικότητας [11].

Το φυσικό αέριο εξορύσσεται από φυσικές αποθέσεις σε υπόγειους σχηματισμούς και αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Η παραγωγή LNG πραγματοποιείται με την υγροποίηση του φυσικού αερίου σε ειδικά σχεδιασμένα εγκαταστάσεις, όπου το αέριο ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία της υγροποίησης (-162°C). Η διαδικασία της υγροποίησης μειώνει τον όγκο του κατά ένα συντελεστή περισσότερο από 600 της εκατό. Μετά την υγροποίηση, το φυσικό αέριο μεταφέρεται με πλοία LNG σε διάφορες περιοχές του κόσμου [12].

Τα αποθέματα φυσικού αερίου είναι σημαντικά με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA) να εκτιμά ότι με τους τρέχοντες ρυθμούς χρήσης είναι άνω των 250 ετών. Αποτελεί ένα αέριο με χαμηλή πυκνότητα και χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο σε σύγκριση με άλλα καύσιμα που αποτελούν προϊόντα πετρελαίου και είναι πρακτικά απαλλαγμένο από εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα.

Το LNG είναι ένα μείγμα πολλών αερίων, σε υγρή μορφή, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), με συγκέντρωση που μπορεί να ποικίλλει από 70 έως 99 τοις εκατό κατά μάζα, ανάλογα με την προέλευση του φυσικού αερίου. Άλλοι υδρογονάνθρακες που βρίσκονται συνήθως ως συστατικά στο LNG είναι το αιθάνιο (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), το προπάνιο (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) και το βουτάνιο (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>). Υπάρχει πιθανότητα επίσης να υπάρχουν μικρές ποσότητες άλλων αερίων, όπως το άζωτο (N<sub>2</sub>) [11].

| Component | Short Symbol   | Light LNG | Heavy LNG | LNG with Nitrogen |
|-----------|----------------|-----------|-----------|-------------------|
|           |                | [% mol]   | [% mol]   | [% mol]           |
| Methane   | C <sub>1</sub> | 96,0      | 87,0      | 92,0              |
| Ethane    | C <sub>2</sub> | 2,5       | 9,0       | 4,0               |
| Propane   | C <sub>3</sub> | 1,0       | 3,0       | 0,7               |
| Butanes   | C <sub>4</sub> | 0,25      | 0,5       | 0,3               |
| Nitrogen  | N <sub>2</sub> | 0,25      | 0,5       | 3,0               |

Πίνακας 3.2: Σύνθεση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου

### **Βασικές Ιδιότητες**

Η βασική γνώση του LNG πρέπει να ξεκινά με την εξέταση των χημικών και φυσικών ιδιοτήτων του, η οποία αποτελεί προϋπόθεση για την ακριβή αξιολόγηση των πιθανών κινδύνων και κινδύνων για την ασφάλεια του LNG.

Οι ιδιότητες του LNG ποικίλλουν ανάλογα με τη σύνθεσή του, η οποία εξαρτάται από την πηγή δεξαμενής του αρχικού αερίου και το ιστορικό επεξεργασίας/κλασματοποίησής του. Ενώ το LNG είναι κυρίως μεθάνιο (περίπου 87 mole % έως 99 mole %), η σύνθεσή του περιλαμβάνει επίσης άλλους υψηλότερους υδρογονάνθρακες, συνήθως C<sub>2</sub> μέχρι C<sub>4</sub>, και βαρύτερους όπως άζωτο και ίχνη θείου (λιγότερο από 4ppmv) και CO<sub>2</sub> [12].

Το LNG είναι άοσμο, άχρωμο και μη διαβρωτικό κρυογονικό υγρό σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Όταν το LNG εξατμίζεται και χρησιμοποιείται ως καύσιμο φυσικού αερίου, δημιουργεί πολύ χαμηλές εκπομπές σωματιδίων και σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές άνθρακα από άλλα καύσιμα υδρογονανθράκων. Το προϊόν καύσης από το LNG περιέχει σχεδόν καθόλου οξειδία του θείου και χαμηλό επίπεδο οξειδίων του αζώτου, γεγονός που καθιστά το LNG καθαρή πηγή ενέργειας. Αν και πράγματι μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ως καύσιμο με βάση τον άνθρακα, το LNG συνεχίζει να εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως επιλογή μετριασμού [13].

Το LNG είναι μη τοξικό. Ωστόσο, όπως συμβαίνει με κάθε αέριο υλικό, η απελευθέρωση φυσικού αερίου από το LNG μπορεί να προκαλέσει ασφυξία λόγω έλλειψης οξυγόνου σε μη αεριζόμενο, περιορισμένο χώρο και μπορεί να αναφλεγεί εάν αναμειχθεί με τις σωστές συγκεντρώσεις αέρα. Το σημείο βρασμού του LNG ποικίλλει ανάλογα με τη σύνθεσή του, συνήθως είναι -162 βαθμούς Κελσίου. Η πυκνότητα του LNG συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 430 kg/m<sup>3</sup> και 470 kg/m<sup>3</sup>, που είναι λιγότερο από το μισό της πυκνότητας του νερού. Το LNG, εάν χυθεί στο νερό, επιπλέει από πάνω και εξατμίζεται γρήγορα επειδή είναι πολύ ελαφρύτερο από το νερό. Αρχικά οι ατμοί LNG είναι βαρύτεροι από τον αέρα και παραμένουν κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Ωστόσο, καθώς οι ατμοί LNG αρχίζουν να θερμαίνονται από το περιβάλλον και φτάνουν σε θερμοκρασίες περίπου -166 βαθμών Φαρενάιτ, η πυκνότητα των ατμών είναι ελαφρύτερη από τον αέρα και οι ατμοί γίνονται πλευστοί. Οι κρύοι ατμοί LNG (κάτω από -166 βαθμούς Φαρενάιτ) είναι πιο πιθανό να συσσωρευτούν σε χαμηλές περιοχές μέχρι να ζεσταθούν οι ατμοί. Η απελευθέρωση LNG σε και

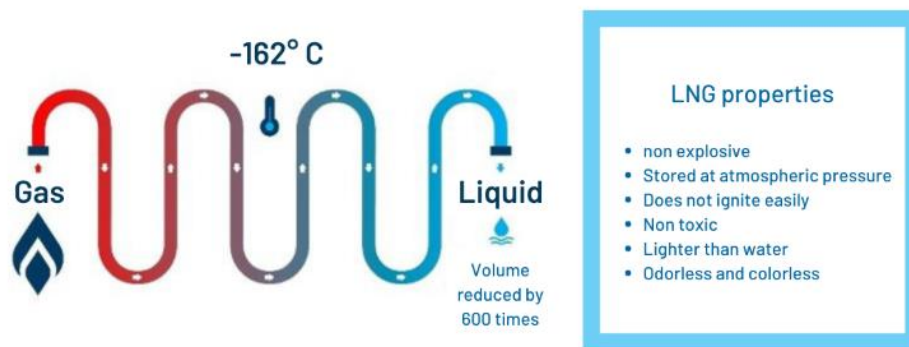
κλειστό χώρο ή χαμηλό σημείο θα τείνει να εκτοπίσει τον αέρα, καθιστώντας την περιοχή επικίνδυνη για την αναπνοή [13].

Οι ατμοί που απελευθερώνονται από το LNG, εάν δεν περιέχονται, θα αναμειχθούν με τον περιβάλλοντα αέρα και θα μεταφερθούν προς τον άνεμο, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει ένα σύννεφο ατμών που μπορεί να γίνει εύφλεκτο και εκρηκτικό. Τα όρια ευφλεκτότητας είναι 5 τοις εκατό και 15 τοις εκατό κατ' όγκο στον αέρα. Ωστόσο, εκτός αυτού του εύρους, το μείγμα μεθανίου/αέρα δεν είναι εύφλεκτο.

Όταν η συγκέντρωση του καυσίμου υπερβαίνει το ανώτερο όριο αναφλεξιμότητας, δεν μπορεί να καεί επειδή υπάρχει πολύ λίγο οξυγόνο. Αυτή η κατάσταση υπάρχει, για παράδειγμα, σε μια κλειστή, ασφαλή δεξαμενή αποθήκευσης όπου η συγκέντρωση ατμού είναι περίπου 100 τοις εκατό μεθάνιο. Όταν η συγκέντρωση του καυσίμου είναι κάτω από το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας, δεν μπορεί να καεί επειδή υπάρχει πολύ λίγο μεθάνιο. Ένα παράδειγμα είναι η διαρροή μικρών ποσοτήτων LNG σε καλά αεριζόμενο χώρο. Σε αυτήν την κατάσταση, ο ατμός LNG θα αναμιχθεί γρήγορα με τον αέρα και θα διαλυθεί σε συγκέντρωση μικρότερη από 5 τοις εκατό [11].

Το εξατμισμένο LNG έχει τα ίδια θερμικά χαρακτηριστικά με το φυσικό αέριο. Σε καλά αεριζόμενους χώρους, το φυσικό αέριο καίγεται με χαμηλή στρωτή ταχύτητα καύσης και έχει υψηλή ενέργεια ανάφλεξης σε σχέση με άλλα καύσιμα υδρογονανθράκων. Οι ατμοί φυσικού αερίου σε ανοιχτούς χώρους δεν έχουν προκαλέσει πολλές εκρήξεις νέφους ατμών, οι οποίες είναι πιο διαδεδομένες με υψηλότερους υδρογονάνθρακες. Το εάν οποιοδήποτε εύφλεκτο νέφος ατμών απλώς καίγεται πίσω στην πηγή ατμού ή υφίσταται έκρηξη εξαρτάται από πολλούς παράγοντες: τη χημική δομή των μορίων ατμού, το μέγεθος και τη συγκέντρωση του νέφους ατμών, την ισχύ της πηγής ανάφλεξης και τον βαθμό περιορισμού του το σύννεφο ατμών. Οι συνθήκες που απαιτούνται για την παραγωγή μιας απεριόριστης έκρηξης νέφους ατμών φυσικού αερίου γενικά δεν υπάρχουν σε εγκαταστάσεις LNG, επομένως μια τέτοια έκρηξη δεν θα πρέπει να θεωρείται ως δυνητικός κίνδυνος [13].

Η βιομηχανία LNG έχει εξαιρετικό ιστορικό ασφάλειας πολλών παραγόντων. Πρώτον, η βιομηχανία έχει αναπτυχθεί για να διασφαλίζει ασφαλείς και ασφαλείς λειτουργίες, από τη μηχανική έως την τεχνική ικανότητα του προσωπικού. Δεύτερον, η φυσική και χημική ιδιότητα του LNG είναι καλά κατανοητή και τα σχέδια των εγκαταστάσεων είναι καλά αποδεδειγμένα μέσα από πολλά χρόνια λειτουργίας. Τρίτον, τα πρότυπα, οι κώδικες και οι κανονισμοί που έχουν αναπτυχθεί για τη βιομηχανία LNG διασφαλίζουν την ασφάλεια και εξελίσσονται και βελτιώνονται συνεχώς [11].



Εικόνα 3.8: Ιδιότητες του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG)

### LNG στην Ναυτιλία

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη χρήση του LNG ως καύσιμο πλοίων. Οι κύριοι λόγοι που το LNG έχει γίνει δημοφιλές ως καύσιμο για τη ναυτιλία είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς και η μείωση των εκπομπών ρύπων, όπως των οξειδίων του αζώτου και του θείου. Το LNG προσφέρει επίσης υψηλότερη απόδοση καύσης σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη οικονομία στη χρήση του. Όσον αφορά τα συμβατικά καύσιμα πλοίων, το LNG μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά περίπου 20–30% (ακόμη και σε σύγκριση με καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο), εξαλείφει σχεδόν πλήρως τις εκπομπές SO<sub>x</sub> και PM και μειώνει τις εκπομπές NO<sub>x</sub> έως και 85%. Το LNG είναι εμπορικά ελκυστικό και διαθέσιμο σε όλο τον κόσμο σε ποσότητες ικανές να ανταποκριθούν στη ζήτηση καυσίμων από τη ναυτιλία τις επόμενες δεκαετίες. Ο αριθμός των πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο αυξάνεται ραγδαία. Σύμφωνα με ορισμένους μετεωρολόγους, η ετήσια ζήτηση για bunker LNG από τον ναυτιλιακό τομέα αναμένεται να είναι μεταξύ 20 και 30 εκατομμυρίων τόνων μέχρι το 2030, ενώ αυτή τη στιγμή υπολογίζεται σε λιγότερο από ένα εκατομμύριο τόνους ετησίως. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η υιοθέτηση του LNG σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα ορισμένων παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης της τιμής των συμβατικών καυσίμων και της ανάπτυξης των απαραίτητων εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού σε παγκόσμιο επίπεδο. [14].

Η υποδομή ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου βελτιώνεται συνεχώς, με τα καύσιμα να είναι ήδη διαθέσιμα στους περισσότερους μεγάλους ναυτιλιακούς κόμβους. Η απορρόφηση LNG είναι πολύ ισχυρή τα τελευταία χρόνια, ειδικά στα νεότευκτα. Αυτό οφείλεται σε συνδυασμό των περιβαλλοντικών οφελών και των ελκυστικών τιμών των καυσίμων, με αποτέλεσμα η τάση αυτή να επιταχύνεται [15].

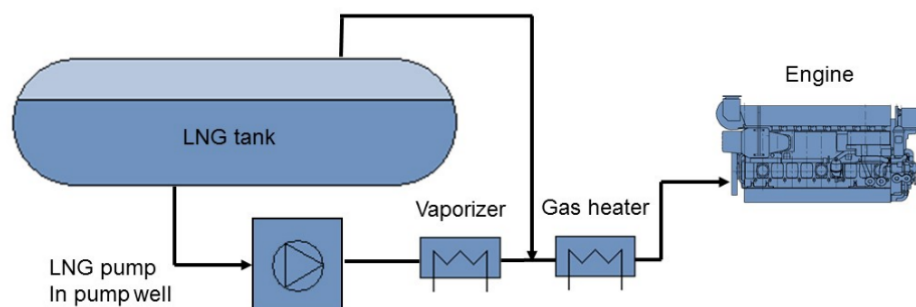
Η μετάβαση στο LNG ως καύσιμο μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, ικανοποιώντας τις κανονιστικές απαιτήσεις, προσφέροντας ενισχυμένη ανταγωνιστικότητα, καθώς και βελτίωση της συνολικής ποιότητας του αέρα και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα πλοία που τροφοδοτούνται με LNG μπορούν να μειώσουν τη βαθμολογία EEDI τους κατά 20%, ενώ ο δείκτης έντασης άνθρακα τους θα μειωθεί κατά περίπου το ίδιο ποσό [14].

Και οι δύο κατασκευαστές θαλάσσιων δίχρονων κινητήρων αργής ταχύτητας, η MAN Energy Solutions και η Winterthur Gas & Diesel (WinGD), προσφέρουν κινητήρες εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου (Double Fuel DF). Ωστόσο, κάθε κατασκευαστής έχει επιλέξει ένα εντελώς διαφορετικό τρόπο διαδικασίας καύσης για όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε λειτουργία αερίου. Οι δύο διαφορετικές έννοιες λειτουργίας καύσης αερίου είναι κινητήρες αερίου χαμηλής πίεσης (LP) που χρησιμοποιούν τον κύκλο Otto και κινητήρες αερίου υψηλής πίεσης (HP) που χρησιμοποιούν τον κύκλο Diesel.

Οι κινητήρες WinGD LP DF (X-DF) χρησιμοποιούν τη διαδικασία Otto σε λειτουργία αερίου και τη συμβατική διαδικασία Diesel όταν είναι σε λειτουργία πετρελαίου. Οι κινητήρες MAN HP DF (ME-GI) χρησιμοποιούν τη διαδικασία καύσης ντίζελ και σε λειτουργία πετρελαίου και αερίου. Για και στις δύο έννοιες, το αέριο αναφλέγεται με μια πιλοτική έγχυση υγρού καυσίμου από το συμβατικό σύστημα έγχυσης καυσίμου, ή ένα ειδικό πιλοτικό σύστημα καυσίμου. Το σημείο κατά τη διάρκεια του κύκλου καύσης όπου γίνεται η έγχυση του αερίου υπαγορεύει το απαιτούμενη πίεση παροχής αερίου [14].

Το WinGD X-DF έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε πίεση παροχής αερίου έως και 13 bar, ενώ το σύστημα υψηλής πίεσης MAN ME-GI χρησιμοποιεί αέριο που παρέχεται από σύστημα άμεσης έγχυσης στα 300 bar περίπου. Τα δύο διαφορετικά σχέδια οδηγούν σε διαφορετικές έννοιες καύσης, κύκλος Otto για το X-DF και κύκλος Diesel για το ME-GI, και επομένως έχουν διαφορετική απόδοση και χαρακτηριστικά εκπομπών. Μια πρόσφατη ανακοίνωση της MAN αφορούσε την ανάπτυξη του DF χαμηλής πίεσης κινητήρα, ME-GA [14].

## LNG fuel system with pump



Εικόνα 3.9: LNG ως καύσιμο στην Ναυτιλία

Παρακάτω συνοψίζονται τα οφέλη που προσφέρει το LNG ως καύσιμο στην Ναυτιλία [14]:

- **Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα:** Μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συμμόρφωση με τους κανονισμούς για τις εκπομπές, και χαμηλότερα επίπεδα ρύπων όπως το διοξείδιο του θείου και το διοξείδιο του αζώτου.
- **Εξοικονόμηση κόστους:** Σταθερές τιμές και πιθανή αύξηση της απόδοσης του καυσίμου οδηγούν σε μειωμένα λειτουργικά κόστη για τις ναυτιλιακές εταιρείες.
- **Ενεργειακή απόδοση:** Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μειωμένες απώλειες ενέργειας οδηγούν σε μεγαλύτερα ταξίδια και βελτιωμένη απόδοση καυσίμου.
- **Βελτιωμένη ασφάλεια:** Το LNG είναι λιγότερο εύφλεκτο και αποθηκεύεται με ασφάλεια σε κρυογενικούς δεξαμενές.
- **Μείωση θορύβου:** Οι κινητήρες LNG είναι πιο αθόρυβοι, βελτιώνοντας την άνεση του πληρώματος και μειώνοντας τη θορυβορύπανση.
- **Διευρυνόμενη υποδομή:** Η αυξανόμενη υποδομή για τον προμηθευτικό υγροποιημένου φυσικού αερίου σε μεγάλους λιμένες αυξάνει τη διαθεσιμότητα.
- **Στήριξη από κανονισμούς:** Ορισμένες κυβερνήσεις και ρυθμιστικοί φορείς προσφέρουν κίνητρα για την προώθηση της χρήσης του LNG.
- **Προσαρμογή στο μέλλον:** Το LNG θεωρείται ως ένα μεταβατικό καύσιμο που μπορεί να συμμορφώνεται με τους τρέχοντες και μελλοντικούς κανονισμούς για τις εκπομπές, λειτουργώντας ως γέφυρα προς πιο καθαρές εναλλακτικές λύσεις.

## Υδρογόνο

Ο λειτουργικός κύκλος του υδρογόνου ως καυσίμου στη βιομηχανία βασίζεται σε μια σειρά χημικών διεργασιών που παράγουν ενέργεια και απόβλητα σε μια πολύ αποδοτική και καθαρή μορφή. Υπάρχουν πολλοί τρόποι παραγωγής υδρογόνου, μερικοί από τους οποίους είναι πιο αποδοτικοί και περιβαλλοντικά βιώσιμοι από άλλους. Οι βασικοί τρόποι παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν [16]:

**Ηλεκτρολύση:** Αυτή είναι η πιο κοινή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Κατά την ηλεκτρολύση, το νερό ( $H_2O$ ) υποστέλλεται σε υδρογόνο ( $H_2$ ) και οξυγόνο ( $O_2$ ) χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι πολύ αειφόρος όταν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια.

**Ατμολύση:** Κατά την ατμολύση, θερμό νερό χρησιμοποιείται για να αντιδράσει με ενός είδους υδρογόνου πυροφόρο υλικό, όπως η μεθανόλη ή η αμμωνία. Η ατμολύση είναι μια αποδοτική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου, αλλά εξαρτάται από την πηγή θερμότητας.

**Φωτοθερμική Αντιδραστήρας:** Κατά τη φωτοθερμική αντίδραση, φωτοκαταλυτικά υλικά χρησιμοποιούνται για να αντιδράσουν με το νερό και να παράγουν υδρογόνο υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η μέθοδος είναι ελπιδοφόρα για την παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ενέργεια.

**Βιολογική Παραγωγή:** Ορισμένα μικρόβια μπορούν να παράγουν υδρογόνο κατά τη διάρκεια της αναπνοής τους. Αυτή η βιολογική παραγωγή χρησιμοποιεί μικρόβια όπως τα υδρογόνοφιλα βακτήρια.

**Παραγωγή από Ορυκτά Καύσιμα:** Το υδρογόνο μπορεί επίσης να εξαχθεί από ορυκτά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, με έναν διαδικασία που ονομάζεται "μετασχηματισμός". Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι λιγότερο βιώσιμη αν δεν χρησιμοποιούνται καθαρές τεχνολογίες. Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματά της και τις προκλήσεις της, και η επιλογή της καταλληλότερης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας πηγών ενέργειας, του κόστους και της βιωσιμότητας.

Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί κρίσιμη διαδικασία για την ασφαλή και αποδοτική χρήση του ως καυσίμου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αποθήκευσης του υδρογόνου, καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Ο πρώτος τρόπος αποθήκευσης είναι με πυκνούς αερίους δοχεία, όπου το υδρογόνο αποθηκεύεται υπό πολύ υψηλή πίεση. Αυτή η μέθοδος είναι αποτελεσματική αλλά απαιτεί ανθεκτικά υλικά για τα δοχεία και αυστηρές ασφαλιστικές προδιαγραφές. Ο δεύτερος τρόπος είναι η αποθήκευση ως υγρό υδρογόνο ( $LH_2$ ) με χαμηλή θερμοκρασία. Σε αυτήν τη μέθοδο, το υδρογόνο ψύχεται σε ακραία χαμηλές θερμοκρασίες για να γίνει υγρό, μειώνοντας έτσι τον όγκο του. Αυτή η τεχνική απαιτεί εξελιγμένα συστήματα ψύξης. Τρίτος τρόπος αποθήκευσης είναι η χημική αποθήκευση, όπου το υδρογόνο αντιδρά με χημικούς φορείς, όπως υδρογονάνθρακες ή υδροξείδια μετάλλων. Αυτή η μέθοδος προσφέρει σταθερότητα

και ασφάλεια στην αποθήκευση. Τέλος, η υδραυλική αποθήκευση είναι μια πειραματική μέθοδος όπου το υδρογόνο αποθηκεύεται σε υγρά μέσα υψηλής πίεσης και χρησιμοποιείται ως υδραυλικό μέσο. Αυτή η τεχνολογία εξελίσσεται ακόμα. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων της εφαρμογής, των συνθηκών και του επιπέδου ασφαλείας που απαιτείται. Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί βασικό κομμάτι της υδρογονοκίνησης και της αειφόρου ενέργειας. Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε υποδομές μεταφοράς όπως αγωγοί, δοχεία, ή δεξαμενές μεταφοράς. Κατά τη μεταφορά, πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αποφυγή αποδιάρροής του υδρογόνου, διότι είναι εύφλεκτο και εκρηκτικό. [16].

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους τρόπους για την παραγωγή έργου. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε εσωτερικές μηχανές καύσης, όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης και αντλίες καύσης. Κατά τη διάρκεια της καύσης, το υδρογόνο αντιδρά με τον οξυγόνο για να παράγει θερμότητα και νερό, χωρίς εκπομπές CO<sub>2</sub>. Κατά τη διάρκεια της καύσης του υδρογόνου, το H<sub>2</sub> αντιδρά με τον οξυγόνο (O<sub>2</sub>) από τον αέρα για να παράγει θερμότητα και νερό (H<sub>2</sub>O) ως πρωτεύον προϊόν. Η αντίδραση είναι εξαιρετικά καθαρή και δεν παράγει εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την καύση. Οι μηχανές που χρησιμοποιούν υδρογόνο ως καύσιμο μπορούν να λειτουργούν αποδοτικά και να παράγουν υψηλή ισχύ. Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η απουσία των εκπομπών CO<sub>2</sub> και το γεγονός ότι η καύση του υδρογόνου δεν προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση. Αυτός ο κύκλος αποτελεί τη βάση της χρήσης του υδρογόνου στη βιομηχανία για αειφόρο και καθαρή ενέργεια. Άλλοι τρόποι για την παραγωγή έργου είναι η χρήση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμων. Οι κυψέλες καυσίμων λειτουργούν με τη χρήση υδρογόνου ως καυσίμου και μετατρέπουν το υδρογόνο και τον οξυγόνο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, παράγοντας μόνο νερό ως προϊόν. Οι κυψέλες καυσίμων χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα συμπεριλαμβανομένων των υδρογονοκίνητων αυτοκινήτων [16].

Οι πολλές δυνατότητες χρήσης του υδρογόνου το καθιστούν ελπιδοφόρο καύσιμο για τη μετάβαση σε πιο βιώσιμες πηγές ενέργειας και την παραγωγή έργου σε πολλούς τομείς.

### Υδρογόνο στην Ναυτιλία

Το υδρογόνο (H<sub>2</sub>) έχει εμφανιστεί ως μια αναλλοίωτη εναλλακτική πηγή καυσίμου με τεράστιο δυναμικό στον τομέα της ναυτιλίας. Αποτελεί το πιο διαρκές στοιχείο στο σύμπαν και μπορεί να παραχθεί με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της βιώσιμης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα οφέλη του Υδρογόνου ως καύσιμο στην Ναυτιλία είναι αρκετά και παρουσιάζονται παρακάτω [14]:

- **Μηδενικές Εκπομπές CO<sub>2</sub>:** Το κυριότερο όφελος της χρήσης υδρογόνου στη ναυτιλία είναι η πλήρης απουσία εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Κατά την καύση, το υδρογόνο αντιδρά με τον οξυγόνο και παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Αυτό συμβάλλει στη μείωση της κλιματικής αλλαγής και της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα.



- **Αυξημένη Απόδοση:** Το υδρογόνο έχει μεγάλη ενεργειακή αποθηκευτική δυνατότητα και υψηλή πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας. Αυτό το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή απόδοση, όπως η ναυτιλία.
- **Στρατηγική Ανεξαρτησία:** Η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να γίνει από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό εξασφαλίζει στρατηγική ανεξαρτησία από την εισαγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου.
- **Ελάχιστα Λειτουργικά Κόστη:** Η συντήρηση των συστημάτων υδρογόνου είναι συνήθως απλή και τα λειτουργικά κόστη είναι συγκρίσιμα με άλλα καύσιμα.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης του υδρογόνου στη ναυτιλία, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη [14]:

- **Υδρογονανθρακική Παραγωγή:** Η παραγωγή του υδρογόνου από υδρογονάνθρακες, όπως το φυσικό αέριο, μπορεί να συνδέεται με την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), εκτός αν χρησιμοποιούνται διαδικασίες αποθήκευσης και απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub>. Αυτό μπορεί να μειώσει τα περιβαλλοντικά οφέλη.
- **Ασφάλεια:** Το υδρογόνο είναι εύφλεκτο και μπορεί να προκαλέσει εκρήξεις αν δεν αντιμετωπιστεί με προσοχή. Αυτό απαιτεί πρόσθετα μέτρα ασφαλείας στην αποθήκευση, τη μεταφορά και τη χρήση του.
- **Απαιτητικότητα στην Υποδομή:** Η υποδομή για την παραγωγή, την αποθήκευση και τη διανομή του υδρογόνου είναι ακόμα περιορισμένη και απαιτεί σημαντικές επενδύσεις.
- **Μεταφορά:** Το υδρογόνο έχει χαμηλή πυκνότητα ενέργειας και ως αέριο πρέπει να αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση ή σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάτι που μπορεί να δυσκολεύει τη μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις.
- **Κόστος:** Η παραγωγή, η αποθήκευση και η διανομή του υδρογόνου μπορεί να είναι ακόμα ακριβή σε σχέση με άλλα καύσιμα, αν και αναμένεται να μειωθεί με την αύξηση της κλίμακας και την τεχνολογική εξέλιξη.

Η χρήση του υδρογόνου στη ναυτιλία έχει πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, καθώς προσφέρει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στους παραδοσιακούς καυσίμους και μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ορισμένες εφαρμογές του υδρογόνου στη ναυτιλία περιλαμβάνουν [14]:

- **Υδρογονοκίνηση Πλοίων:** Τα πλοία μπορούν να λειτουργήσουν με κινητήρες που λειτουργούν με υδρογόνο, είτε μέσω κυψελών καυσίμου είτε με άμεση καύση. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και άλλων ρυπαντικών.
- **Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου:** Οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν μια αποδοτική τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με τη χρήση υδρογόνου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κίνηση των πλοίων και την παροχή ενέργειας για ηλεκτρικά συστήματα.

- **Αποθήκευση Ενέργειας:** Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας στα πλοία. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και την ευελιξία του συστήματος ενέργειας.
- **Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας:** Σε πλοία που διαθέτουν κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κίνηση των κινητήρων και την τροφοδοσία των συστημάτων ενεργούς ψύξης και θέρμανσης.
- **Εφαρμογές Συμπληρωματικής Ενέργειας:** Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή συμπληρωματικής ενέργειας σε περιπτώσεις υψηλής κατανάλωσης ενέργειας, όπως κατά τη διάρκεια της αγκυροβόλησης στο λιμάνι.

Το υδρογόνο αναδύεται ως ένα υποσχόμενο καύσιμο για τη ναυτιλία, παρέχοντας αποδοτική, καθαρή και αειφόρο εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές πηγές ενέργειας. Παρόλο που υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας του υδρογόνου ενισχύει την προοπτική του ως καυσίμου που θα συμβάλει στη μείωση της επίδρασης της ναυτιλίας στο περιβάλλον και το κλίμα.



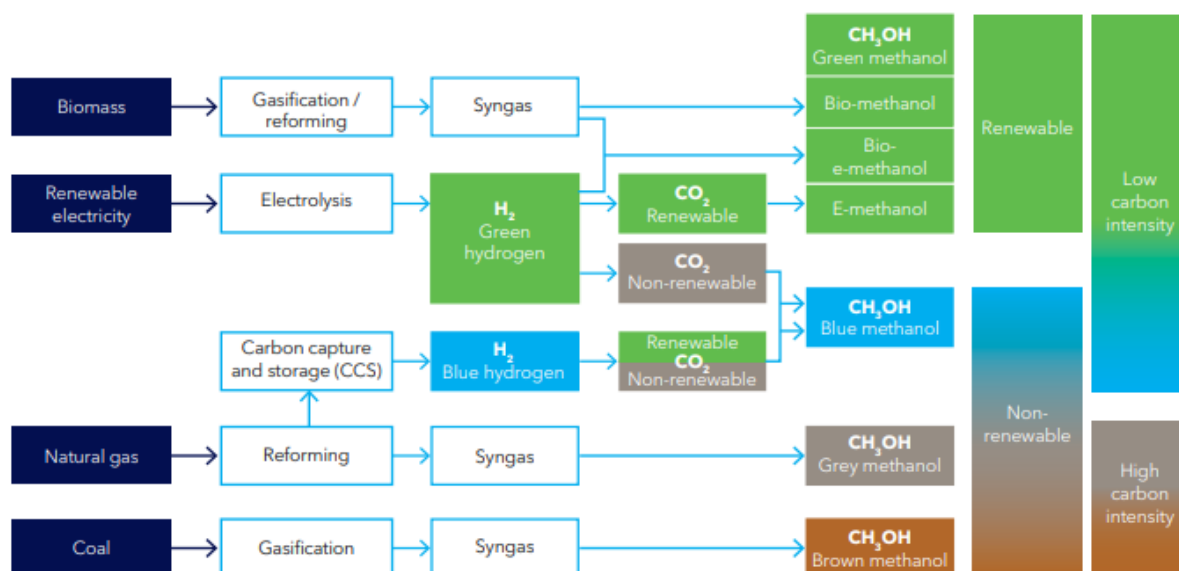
*Εικόνα 3.10: Χρήση Υδρογόνου στην Ναυτιλία*

Συνοψίζοντας, η χρήση του υδρογόνου στη ναυτιλία προσφέρει μια υποσχόμενη εναλλακτική λύση για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας του τομέα της ναυτιλίας. Οι εφαρμογές του υδρογόνου στη ναυτιλία περιλαμβάνουν την κίνηση πλοίων, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την αποθήκευση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών. Παρόλα αυτά, η ευρεία υιοθέτηση του υδρογόνου στη ναυτιλία αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως την ασφάλεια, την υποδομή, το κόστος και την παραγωγή βιώσιμου υδρογόνου. Είναι αναγκαία η συνεχής έρευνα, ανάπτυξη και επένδυση σε αυτόν τον τομέα για να επιτευχθεί μια βιώσιμη και αποδοτική μετάβαση στην χρήση του υδρογόνου στη ναυτιλία και να επωφεληθεί το περιβάλλον.

## Μεθανόλη

Η μεθανόλη βρίσκεται στο αρχικό στάδιο της εισαγωγής στην αγορά, αλλά έχουν ήδη πραγματοποιηθεί ορισμένες δοκιμές μεγάλης κλίμακας. Είναι ευκολότερο να αποθηκεύεται και να διανέμεται από το LNG επειδή είναι υγρή σε θερμοκρασία δωματίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως σε κινητήρες διπλού καυσίμου και προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών NOx και PM, ενώ είναι απαλλαγμένο από θείο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με τους κανονισμούς SECA. Η μεθανόλη είναι προς το παρόν διαθέσιμη σε όγκο, αλλά λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας σχετικών παγκόσμιων υποδομών και εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού καυσίμων για τη ναυτιλία, δεν αναμένεται σύντομα να διαδραματίσει βασικό ρόλο ως εναλλακτικό καύσιμο στον ναυτιλιακό τομέα [17].

Η μεθανόλη (χημικός τύπος CH<sub>3</sub>OH) είναι η απλούστερη αλκοόλη, έχει τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και την μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε υδρογόνο από οποιοδήποτε υγρό καύσιμο, και βρίσκεται σε υγρή μορφή μεταξύ -93°C και +65°C σε ατμοσφαιρική πίεση. Αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο για εκατοντάδες βασικά χημικά προϊόντα που συμβάλλουν στην καθημερινή μας ζωή, όπως οικοδομικά υλικά, πλαστικές συσκευασίες, χρώματα και επιστρώσεις. Είναι επίσης καύσιμο μεταφοράς και φορέας υδρογόνου για κυψέλες καυσίμου. Η μεθανόλη μπορεί να παραχθεί από πολλούς διαφορετικούς πόρους πρώτης ύλης, κυρίως φυσικό αέριο ή άνθρακα, αλλά και από ανανεώσιμες πηγές όπως μαύρο υγρό από χαρτοπολτό και χαρτοβιομηχανία, αραίωση δασών ή γεωργικά απόβλητα, ακόμη και απευθείας από το CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Το Σχήμα 1 συνοψίζει τις οδούς που οδηγούν στη μεθανόλη που συνήθως κατηγοριοποιείται ως «καφέ», «γκρι», «μπλε» ή «πράσινο», υποδεικνύοντας με φθίνουσα σειρά το αποτύπωμα άνθρακα της παραγωγής [18].



Σχήμα 3.1: Αρχές Μεθανόλης

Όταν η μεθανόλη παράγεται από φυσικό αέριο, συνήθως εφαρμόζεται ένας συνδυασμός αναμόρφωσης ατμού και μερικής οξειδωσης, με ενεργειακή απόδοση έως περίπου 70% (ορίζεται ως ενέργεια που αποθηκεύεται στη μεθανόλη έναντι ενέργειας που παρέχεται από το φυσικό αέριο). Η μεθανόλη που παράγεται από την αεριοποίηση του άνθρακα βασίζεται σε έναν φθινό, ευρέως διαθέσιμο πόρο, αλλά οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι περίπου δύο φορές υψηλότερες από ό,τι από το φυσικό αέριο. Λόγω της πυκνότητάς τους και της χαμηλότερης τιμής θέρμανσης των 18,2 MJ/liter, οι δεξαμενές καυσίμου μεθανόλης έχουν μέγεθος περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερο από τις δεξαμενές πετρελαίου για το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο. Σε σύγκριση με μια δεξαμενή LNG, η μεθανόλη πρέπει να είναι 1,3 φορές μεγαλύτερη. Η μεθανόλη έχει σημείο ανάφλεξης από 11°C έως 12°C και θεωρείται καύσιμο χαμηλού σημείου ανάφλεξης. Μπορεί επίσης να μετατραπεί σε διμεθυλαιθέρα (DME), ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για κινητήρες ντίζελ [17].

Η πρόσθετη κεφαλαιουχική δαπάνη (CAPEX) για την εγκατάσταση ενός συστήματος μεθανόλης σε ένα σκάφος (π.χ. κινητήρας εσωτερικής καύσης, δεξαμενές καυσίμων, σωληνώσεις) είναι περίπου το ένα τρίτο του πρόσθετου κόστους που σχετίζεται με τα συστήματα LNG. Αυτό είναι γιατί δεν χρειάζονται ειδικά υλικά κατάλληλα για να χειριστούν κρυογονικές θερμοκρασίες ή για δεξαμενές καυσίμου υπό πίεση [14].

Οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) για συστήματα μεθανόλης αναμένεται να είναι συγκρίσιμες με αυτές για πλοία με πετρέλαιο χωρίς τεχνολογία πλυντηρίου (Scrubber). Λόγω του μικρού αριθμού πλοίων που κινούνται με μεθανόλη, η πρακτική εμπειρία είναι περιορισμένη [14].

Η βιομηχανία μεθανόλης είναι παγκόσμια, με παραγωγή στην Αφρική, την Ασία, την Ευρώπη, τη Μέση Ανατολή και τη Βόρεια και Νότια Αμερική. Σε όλο τον κόσμο, υπάρχουν περισσότερες από 90 μονάδες μεθανόλης, με συνδυασμένη παραγωγική ικανότητα περίπου 110 εκατομμυρίων τόνων (Mt). Το ενεργειακό περιεχόμενο είναι ισοδύναμο με περίπου 55 Mt πετρελαίου. Η παγκόσμια ζήτηση μεθανόλης ήταν περίπου 98 Mt το 2020, υπερδιπλάσια από αυτή του 2006. Πάνω από το 60% της μεθανόλης καταναλώνεται επί του παρόντος στην Ασία, όπου η ζήτηση αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Περίπου το 30% χρησιμοποιείται στη Μέση Ανατολή, τη Βόρεια Αμερική και τη Δυτική Ευρώπη, και το ποσοστό αυτό είναι σε μεγάλο βαθμό σταθερό την τελευταία δεκαετία [18].

Αναμένεται ότι η τρέχουσα παραγωγή μπορεί να καλύψει με ασφάλεια τη ζήτηση για μεθανόλη για καύσιμα πλοίων, εάν αρχικά αναπτυχθεί αργά και παραμένει σε μέτρια επίπεδα έως το 2030. Ωστόσο, απαιτείται η διαθεσιμότητα πράσινης μεθανόλης να συμβάλει σε χαμηλές εκπομπές GHG. Η παραγωγή πράσινης μεθανόλης, είτε ως βίο είτε ως συνθετική/ηλεκτρονική μεθανόλη, είναι επί του παρόντος πολύ περιορισμένη. Αρκετοί παραγωγοί διερευνούν την πιθανή ζήτηση και σχεδιάζουν επενδύσεις για την αύξηση της παραγωγής. Δεδομένου του χρόνου που απαιτείται για την ανάπτυξη μονάδων παραγωγής, αναμένεται ότι οι πρώτοι όγκοι πράσινης μεθανόλης θα βγουν στην αγορά το 2024/2025, με μεγαλύτερες ποσότητες να μην είναι διαθέσιμες πριν από το 2030 [17].

Η πράσινη μεθανόλη είναι μια χημική ένωση με τον τύπο  $\text{CH}_3\text{OH}$ , με χρήση πράσινων και βιώσιμων πρώτων υλών και διαδικασιών που ελαχιστοποιούν τον ανθρωπινό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αυτή η πράσινη παραγωγή μεθανόλης συνάδει με τις αρχές της βιωσιμότητας και της προστασίας του περιβάλλοντος. Ο τρόπος παραγωγής της πράσινης μεθανόλης συχνά περιλαμβάνει τη χρήση βιομάζας, όπως ξύλο, βιολογικά απόβλητα, ή φυτικά έλαια, αντί της παραδοσιακής παραγωγής μεθανόλης από ορυκτά αποθέματα, οπότε αποφεύγεται η εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) που συνήθως συνοδεύει την παραγωγή μεθανόλης από ορυκτά καύσιμα. Η πράσινη μεθανόλη χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανίες ως καύσιμο, συστατικό χημικών προϊόντων, και ως αλκοολικό ποτό. Επιπλέον, η πράσινη μεθανόλη αναγνωρίζεται για τη δυνατότητά της να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο της βενζίνης και του πετρελαίου για την κίνηση οχημάτων, προσφέροντας μια πιο βιώσιμη επιλογή στον τομέα των μεταφορών [18].

Τα ακόλουθα συστήματα μπορούν να ληφθούν υπόψη για τη χρήση μεθανόλης ως καυσίμου:

- Κύριος κινητήρας με βοηθητικά συστήματα
- Βοηθητικές γεννήτριες ντίζελ με βοηθητικά συστήματα
- Βοηθητικές λέβητες με βοηθητικά συστήματα
- Κυψέλες καυσίμου με μεθανόλη

Η μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε δίχρονους κινητήρες ντίζελ ή τετράχρονους κινητήρες Otto κύκλου με άπαχο καύσιμο. Αυτήν τη στιγμή βρίσκονται υπό ανάπτυξη περισσότεροι τύποι κινητήρων, συμπεριλαμβανομένων τετράχρονων κινητήρων ντίζελ. Μόνο ένας δίχρονος πετρελαιοκινητήρας που διατίθεται στο εμπόριο, η σειρά MAN ME-LGI, χρησιμοποιείται επί του παρόντος σε δεξαμενόπλοια μεθανόλης. Αυτήν τη στιγμή αναπτύσσονται περισσότεροι τύποι και μεγέθη κινητήρων για χρήση σε μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η χρήση μεθανόλης για την πρόωση πλοίων σε κυψέλες καυσίμου είναι επίσης δυνατή, αλλά επί του παρόντος στην πράξη περιορίζεται σε σκοπούς έρευνας ή επίδειξης [14].

Η μεθανόλη έχει χαμηλό αριθμό κετανίου και επομένως κακές ιδιότητες αυτανάφλεξης. Ωστόσο, η λειτουργία των κινητήρων μεθανόλης ακολουθεί τις ίδιες αρχές με τους κινητήρες αερίου διπλού καυσίμου. Ένας μικρός πιλοτικός ψεκασμός καυσίμου, συνήθως μικρότερος από το 5% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται απαιτείται για την ανάφλεξη του μείγματος μεθανόλης-αέρα. Η μεθανόλη εγχέεται με πίεση που φτάνει έως και τα 550 bar. Για τους δίχρονους κινητήρες MAN ME-LGI που είναι ήδη σε λειτουργία, ο σχεδιασμός του κινητήρα δεν διαφέρει σημαντικά, εκτός από το ότι δημιουργεί χώρο για το πρόσθετο σύστημα καυσίμου μέσα και γύρω από τα καλύμματα των κυλίνδρων. Ενώ οι κινητήρες μεθανόλης είναι τουλάχιστον εξίσου αποδοτικοί με τους συμβατικούς κινητήρες ντίζελ, η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα μεθανόλη σημαίνει ότι η κατανάλωση καυσίμου θα είναι υψηλότερη σε όγκο ή μάζα. Το σύστημα καυσίμου ντίζελ δεν διαφέρει σημαντικά σε έναν κινητήρα LGI σε σύγκριση με έναν τυπικό κινητήρα ME. Όπως συμβαίνει και με το MAN ME-LGI το σύστημα καυσίμου ME-LGI μπορεί να μεταβεί σε λειτουργία μαζούτ χωρίς περιορισμό στην ταχύτητα ή το φορτίο. Η χρήση μεθανόλης ως καυσίμου μειώνει τις εκπομπές  $\text{NO}_x$  κατά 30-50%, ενώ η απόδοση του κινητήρα μπορεί επίσης να βελτιωθεί

ελαφρώς σε σύγκριση με τη λειτουργία με μαζούτ. Μπορούν να εγκατασταθούν συστήματα EGR ή καταλύτες SCR για περαιτέρω μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> για συμμόρφωση με τα επίπεδα NO<sub>x</sub> Tier III, ενώ γίνεται επίσης έγχυση νερού είναι δυνατό, το οποίο μπορεί να μειώσει τα NO<sub>x</sub> σε παρόμοια επίπεδα [17].

Η χρήση μεθανόλης ως καυσίμου σε πλοία προσφέρει αρκετά οφέλη, παρόμοια με τη χρήση άλλων πράσινων καυσίμων όπως το LNG (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο). Αυτά τα οφέλη περιλαμβάνουν [14]:

- **Περιβαλλοντικά Οφέλη:** Χαμηλές Εκπομπές: Η καύση της μεθανόλης παράγει χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και χαμηλές εκπομπές ρύπων όπως τοξικά αέρια, σωματίδια και διοξείδιο του θείου (SO<sub>x</sub>).
- **Συμμόρφωση με Κανονισμούς:** Η χρήση μεθανόλης συμμορφώνεται με αυστηρούς διεθνείς κανονισμούς για τις εκπομπές και την προστασία του περιβάλλοντος στη θάλασσα.
- **Λιγότερη Θορυβόρρηση:** Η μεθανόλη προσφέρει ήσυχη λειτουργία κινητήρων, μειώνοντας τον θόρυβο στα πλοία και βελτιώνοντας το περιβάλλον.
- **Μείωση των Τελών Επεξεργασίας:** Η μεθανόλη δεν απαιτεί την ίδια επίπονη επεξεργασία για τη μείωση των εκπομπών όπως τα παραδοσιακά πετρελαιοειδή καύσιμα.
- **Ενεργειακή Απόδοση:** Οι κινητήρες που χρησιμοποιούν μεθανόλη μπορούν να είναι αποτελεσματικοί σε ενεργειακό επίπεδο.

Πρέπει να τονιστεί ότι η Μεθανόλη όπως και το LNG είναι ένα καύσιμο που κατά την καύση του παράγει διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), ωστόσο, γενικά, η καύση της μεθανόλης παράγει λιγότερο CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η μεθανόλη θεωρείται "υγρό καύσιμο" και έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα από το πετρέλαιο και τον άνθρακα. Κατά συνέπεια, κατά την καύση της, παράγει λιγότερο CO<sub>2</sub> ανά μονάδα ενέργειας [14].

Η χρήση της μεθανόλης ως καυσίμου μπορεί να συμβάλει στην απανθρακοποίηση, δηλαδή στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που προκαλούν την αλλαγή του κλίματος. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι με τους οποίους η μεθανόλη συμβάλει σε αυτήν τη διαδικασία [14]:

- **Μειωμένες Εκπομπές CO<sub>2</sub>:** Κατά την καύση της μεθανόλης, παράγονται λιγότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο και το άνθρακα. Αυτή η μείωση των εκπομπών μειώνει την επίδραση του θερμοκηπίου.
- **Χρήση Βιώσιμων Πηγών:** Η παραγωγή μεθανόλης μπορεί να γίνεται από βιώσιμες πηγές όπως βιομάζα, ξύλο, και αγροτικά απόβλητα. Αυτό σημαίνει ότι η μεθανόλη μπορεί να είναι πιο βιώσιμη από περιβαλλοντικής άποψης σε σύγκριση με καύσιμα που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα.
- **Τεχνολογική Καινοτομία:** Η ανάπτυξη και η χρήση της μεθανόλης ως καυσίμου διευκολύνουν την επικέντρωση στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών που είναι φιλικές προς το περιβάλλον, ενισχύοντας έτσι την απανθρακοποίηση.

## Αμμωνία (NH<sub>3</sub>)

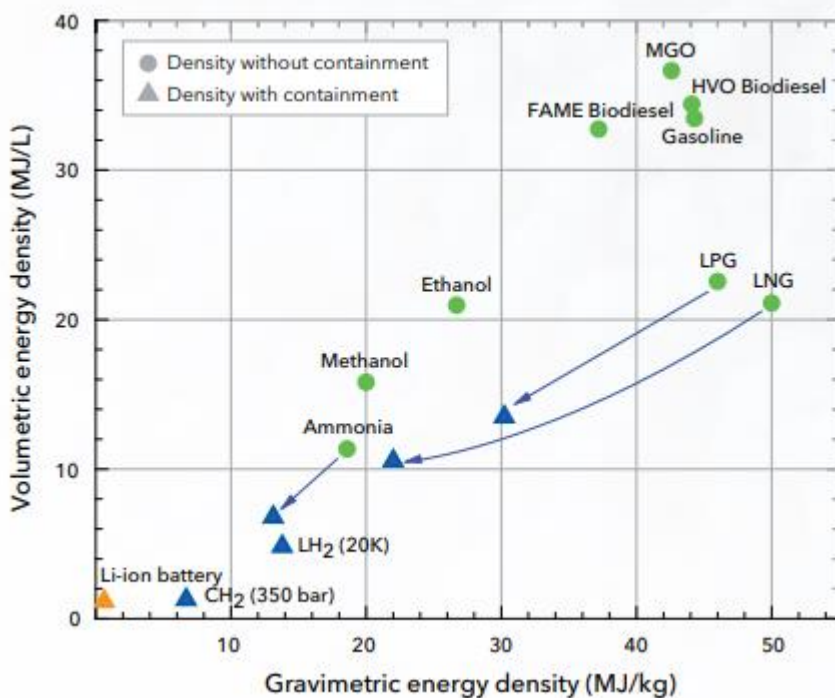
Η χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου πλοίων παρουσιάζει μια σειρά από τεχνολογικές προκλήσεις. Η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) αναγνωρίστηκε ως καύσιμο μηδενικών εκπομπών άνθρακα που μπορεί να εισέλθει στην παγκόσμια αγορά σχετικά γρήγορα και να συμβάλει στην επίτευξη του στόχου μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου για το 2050 που έχει τεθεί από τον IMO. Η αμμωνία προσφέρει στους πλοιοκτήτες και τους χειριστές ένα προφίλ εκπομπών μηδενικού άνθρακα από τη δεξαμενή έως την αφύπνιση, ανεξάρτητα από την πηγή του καυσίμου. Η αμμωνία δημιουργείται συνήθως με συνδυασμό αζώτου με υδρογόνο. Επομένως, οι εκπομπές από την παραγωγή υδρογόνου ως πρώτη ύλη και οι εκπομπές που προκύπτουν από τη σύνθεση αμμωνίας θα πρέπει να θεωρούνται μέρος των εκπομπών του κύκλου ζωής της αμμωνίας. Η αμμωνία, η οποία έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις και εξοπλισμό για περιορισμό και εξοπλισμό από τα περισσότερα άλλα εναλλακτικά καύσιμα υπό εξέταση, σε ένα παγκόσμιο εμπορεύσιμο εμπόρευμα. Υπάρχουν επί του παρόντος πολλοί μικρότεροι φορείς αερίου που μπορεί να είναι κατάλληλοι ως πλοία ανεφοδιασμού. Ωστόσο, για να γίνει η αμμωνία μια εμπορικά βιώσιμη μακροπρόθεσμη επιλογή καυσίμου, πρέπει να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν αυστηροί νέοι κανονισμοί ασφαλείας [19].

Τα καύσιμα μηδενικού άνθρακα, όπως η αμμωνία και το υδρογόνο, έχουν μεγάλες δυνατότητες να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα της ναυτιλίας. Ωστόσο, μία από τις προκλήσεις των εναλλακτικών καυσίμων που εξετάζονται είναι το χαμηλότερο ενεργειακό τους περιεχόμενο σε σύγκριση με το συμβατικό μαζούτ όπως το HFO. Αυτό είναι ιδιαίτερα μια πρόκληση για το υδρογόνο, ωστόσο, καθώς η αμμωνία είναι ένας πιο ογκομετρικά αποδοτικός φορέας υδρογόνου, προσφέρει μια πιθανή πρακτική λύση μηδενικού άνθρακα για τη ναυτιλία. Η χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου αναμένεται να αυξηθεί λόγω της περιεκτικότητάς της σε μηδενικό άνθρακα, της ευκολότερης διανομής, αποθήκευσης και ανεφοδιασμού σε σύγκριση με το υδρογόνο και της καταλληλότητας της με υπάρχουσες και αναδυόμενες τεχνολογίες για πρόωση και παραγωγή ενέργειας [14].

Η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) είναι ένα άχρωμο αέριο σε συνθήκες περιβάλλοντος με μικρότερη πυκνότητα από τον αέρα. Το σημείο βρασμού της είναι -33,3°C και ως εκ τούτου με την εφαρμογή μιας μέτριας πίεσης μπορεί να αντιμετωπιστεί ως υγρό σε θερμοκρασία δωματίου. Σε πιέσεις άνω των 8,6 bar στους 20°C, η αμμωνία είναι ένα υγρό με πυκνότητα 0,61 t/m<sup>3</sup>. Στο σημείο βρασμού, η πυκνότητα είναι 0,68 t/m<sup>3</sup>. Η θερμαντική τιμή για την αμμωνία σε βάση χαμηλότερης τιμής θέρμανσης είναι 18,6 MJ/kg. Έτσι, σε σύγκριση με το MGO το ενεργειακό περιεχόμενο της είναι λιγότερο από το μισό σε μαζική βάση και περίπου 30% σε βάση όγκου σε υγρή κατάσταση. Όταν η αμμωνία αποθηκεύεται υπό πίεση σε δεξαμενές Τύπου, η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα μπορεί να συγκριθεί με το MGO, το LPG και το υδρογόνο (Πίνακας 3). Παρά το χαμηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο της αμμωνίας ανά τόνο σε σύγκριση με το υδρογόνο, η πυκνότητα του καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα μικρότερο όγκο που απαιτείται για την αποθήκευση της ίδιας ενέργειας για την αμμωνία σε σύγκριση με το υδρογόνο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για το συμπιεσμένο υδρογόνο, αλλά και για το υγρό υδρογόνο. Σε σύγκριση με το MGO και το LPG, η απαίτηση χώρου είναι σημαντικά υψηλότερη [20].

|  | MGO   | LPG  | H <sub>2</sub> 350 bar | H <sub>2</sub> liquid | Ammonia |
|--|-------|------|------------------------|-----------------------|---------|
| Density (t/m <sup>3</sup> )            | 0.835 | 0.49 | 0.023                  | 0.071                 | 0.61    |
| LHV (GJ/t)                             | 42.7  | 46   | 120                    | 120                   | 18.6    |
| GJ/m <sup>3</sup>                      | 35.7  | 22.6 | 2.80                   | 8.52                  | 11.4    |
| Volume (m <sup>3</sup> /GJ) normalized | 1     | 1.58 | 12.75                  | 4.18                  | 3.14    |

Πίνακας 3.3: Σύγκριση Αμμωνίας με άλλα καύσιμα



Σχήμα 3.2: Πυκνότητα Καυσίμων σε σύγκριση με την Αμμωνία

Η αμμωνία είναι μια βασική ένωση με μια ευδιάκριτη, πικάντικη, αποπνικτική μυρωδιά. Το τυπικό όριο ανίχνευσης από τον άνθρωπο ποικίλλει σημαντικά από 0,04 έως 53 ppm με μέσο όρο 17 ppm. Ως εκ τούτου, το όριο ανίχνευσης μπορεί να είναι πάνω από τη συγκέντρωση που θεωρείται επικίνδυνη για μακροχρόνια έκθεση και θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ανιχνευτές όταν υπάρχει κίνδυνος για έκθεση σε αμμωνία [20].

Το συνιστώμενο όριο έκθεσης ποικίλλει ανάλογα με τη δικαιοδοσία και με την πάροδο του χρόνου. Η Υπηρεσία Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία των ΗΠΑ (OSHA) έχει ορίσει ως όριο έκθεσης 8 ωρών στην αμμωνία στα 25 ppm και όριο έκθεσης 15 λεπτών στα 35 ppm. Για την Ευρωπαϊκή Ένωση τα αντίστοιχα όρια έκθεσης είναι 20 και 50 ppm. Ο OSHA έχει ορίσει το επίπεδο στο οποίο τα άτομα μπορούν να εκτεθούν χωρίς να υποστούν μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία ως 300 ppm. Η έκθεση σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αερίου αμμωνίας μπορεί να προκαλέσει βλάβη στους πνεύμονες και θάνατο. Ένα αναφερόμενο θανατηφόρο όριο είναι 5.000 ppm ή μόνο 0,5%. Τα διαλύματα αμμωνίας με νερό έχουν ισχυρή αλκαλική αντίδραση. Όντας εξαιρετικά διαλυτή, η αμμωνία απορροφάτε από τα σωματικά υγρά (ιδρώτας, δάκρυα, σάλιο) και μπορεί να προκαλέσει σοβαρά χημικά εγκαύματα. Η ασφάλεια του προσωπικού επί του πλοίου σε



περίπτωση διαρροής αμμωνίας και ο εξοπλισμός έκτακτης ανάγκης για εργασία σε χώρο γεμάτο με αέριο θα πρέπει λαμβάνεται υπόψιν ιδιαίτερα στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Ο ψεκασμός νερού χρησιμοποιείται ως αποτελεσματικό μέσο για την απορρόφηση της αμμωνίας από τον αέρα. Τα ντους έκτακτης ανάγκης και οι σταθμοί πλύσης ματιών χρησιμοποιούνται επί του παρόντος σε χώρους φορτίου αερίου για την αποφυγή τραυματισμού του προσωπικού σε επαφή με αμμωνία. Για τους φορείς αερίου, οι διατάξεις εξαερισμού στους χώρους διαμονής και εργασίας έχουν σχεδιαστεί για να κλείνουν τους ανεμιστήρες εξαερισμού και να σφραγίζουν το διαμέρισμα από το εσωτερικό [14].

Η αμμωνία είναι διαβρωτική σε ορισμένα υλικά όπως ο χαλκός, τα κράματα χαλκού και ο ψευδάργυρος, και πρέπει να δίνεται προσοχή στην επιλογή των υλικών. Η αμμωνία είναι γνωστό ότι προκαλεί διάβρωση λόγω καταπόνησης στους χάλυβες μαγγανίου άνθρακα και νικελίου. Επιπλέον, το διαλυμένο οξυγόνο σε υγρή αμμωνία αυξάνει τον κίνδυνο διάβρωσης λόγω στρες. Η αμμωνία αντιδρά επίσης με CO<sub>2</sub> που μπορεί να περιέχεται σε κάποιο αδρανές αέριο [19].

Η πιθανότητα ρωγμάτωσης λόγω διάβρωσης με τάση μειώνεται επίσης σημαντικά με την προσθήκη μικρής ποσότητας νερού, τουλάχιστον 0,1 wt%. Οι προσθήκες νερού χαμηλής στάθμης στην αμμωνία γίνονται συχνά, αλλά όχι εάν η αμμωνία μεταφέρεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και απαιτείται ψύξης ή αν είναι premium βαθμού. Επιπλέον, η πιθανότητα μειώνεται με τη χρήση δεξαμεμών ανακούφισης από την καταπόνηση μετά τη συγκόλληση εάν η αμμωνία αποθηκεύεται και μεταφέρεται υπό πίεση (σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος ή ημι-ψυγείο). Η χρήση χάλυβα με περιεκτικότητα σε νικέλιο άνω του 5% απαγορεύεται γενικά. Για χάλυβες άνθρακα μαγγανίου, οι ποιότητες υλικού χαμηλότερης αντοχής σε εφελκυσμό, δεν υπερβαίνει τα 410 N/mm<sup>2</sup>. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες μεταφοράς κατά προτίμηση πιο κοντά στο σημείο βρασμού και όχι μεγαλύτερες από -20°C μειώνουν σημαντικά τον κίνδυνο διάβρωσης λόγω καταπόνησης [20].

Υπάρχει ένας αριθμός διαδικασιών μετατροπής της αμμωνίας ως καύσιμο. Η αμμωνία έχει θεωρηθεί ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου, κυρίως κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), καθώς μια κυψέλη καυσίμου PEM θα απαιτούσε πυρόλυση αμμωνίας και είναι πολύ ευαίσθητη στις ακαθαρσίες αμμωνίας. Έχει διεξαχθεί έρευνα για το SOFC, αλλά δεν υπάρχουν τέτοιες εμπορικά διαθέσιμες κυψέλες καυσίμου [19].

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης θεωρούνται καλύτερη επιλογή από τις κυψέλες καυσίμου στο εγγύς μέλλον λόγω κόστους, πυκνότητας ισχύος, απόκρισης φορτίου και στιβαρότητας. Οι δίχρονοι κινητήρες ντίζελ είναι τα προτιμώμενα κύρια συστήματα πρόωσης για μεγάλα πλοία. Ο μεγάλος θάλαμος καύσης και οι μεγάλες χρονικές κλίμακες με χαμηλές στροφές ενός δίχρονου κινητήρα μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα όφελος σε σύγκριση με τους μικρότερους κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενες επιδείξεις. Για τους δίχρονους κινητήρες, η MAN ES έχει αναπτύξει τις σειρές κινητήρων διπλού καυσίμου ME-GI και ME-LGI που έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση μιας σειράς νέων καυσίμων, όπως το LNG, η μεθανόλη, το LPG και το αιθάνιο. Η αμμωνία θεωρείται ότι είναι ένα πιο απαιτητικό καύσιμο και αναμένεται ότι θα απαιτηθεί πιλοτικό καύσιμο όπως το ντίζελ και πιθανώς μεγαλύτερη ποσότητα από ό,τι για το

υγραέριο. Η MAN ES έχει αρχίσει να αναπτύσσει δίχρονους κινητήρες για αμμωνία, οι οποίοι πιθανότατα θα βασίζονται στον κινητήρα ME-LGI που χρησιμοποιείται για το υγραέριο και αναμένεται να παραδοθούν εντός πέντε ετών. Αναμένεται ότι τα πακέτα εκ των υστέρων θα είναι διαθέσιμα για υπάρχοντες κινητήρες MAN [9].

Η σειρά βαλβίδων καυσίμου συνδέει το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου με τον κινητήρα μέσω μιας κύριας βαλβίδας καυσίμου. Για σκοπούς καθαρισμού, η σειρά βαλβίδων συνδέεται επίσης με μια πηγή αζώτου. Συνήθως, η σειρά βαλβίδων θα τοποθετηθεί έξω από το μηχανοστάσιο σε ειδικό χώρο πάνω από το κατάστρωμα καιρού για να βελτιωθεί η ασφάλεια. Από το συρμό βαλβίδων, το καύσιμο τροφοδοτείται στον κινητήρα σε έναν σωλήνα διπλού τοιχώματος μέσω του μηχανοστασίου. Το σύστημα παρακολουθείται από αισθητήρες (sniffers). Εάν η αμμωνία ανιχνεύεται μέσα στον σωλήνα διπλού τοιχώματος, το σύστημα ασφαλείας θα μεταβεί σε λειτουργία μαζούτ ομαλά και χωρίς καμία απώλεια ισχύος. Για τους κινητήρες ME-LGI υγρό καύσιμο, ο ψεκασμός πραγματοποιείται μέσω μιας λεγόμενης βαλβίδας έγχυσης ενισχυτή καυσίμου, η οποία χρησιμοποιεί υδραυλική ισχύ για να αυξήσει την πίεση του καυσίμου και έτσι εξαλείφει την ανάγκη για γραμμές καυσίμου υψηλής πίεσης. Το σύστημα παροχής καυσίμου χαμηλής πίεσης μειώνει το κόστος και το βάρος και προσθέτει στην απλότητα του συστήματος. Όσον αφορά τους τετράχρονους κινητήρες, η Wärtsilä επενδύει στην έρευνα και την ανάπτυξη για να βελτιώσει την ευελιξία των καυσίμων για να καλύψει επίσης καύσιμα χωρίς άνθρακα όπως η αμμωνία. Επί του παρόντος αναπτύσσονται τεχνολογίες για τη χρήση του σε θαλάσσια σκάφη. Οι πιο πρόσφατες πλατφόρμες προϊόντων, όπως η W31, παρέχουν σπονδυλωτότητα για την πιθανή μελλοντική μετατροπή για χρήση αμμωνίας, είτε από πλατφόρμες ντίζελ, διπλού καυσίμου ή με ανάφλεξη με σπινθήρα. Η τελική απόφαση για την ανάπτυξη ενός εμπορικού προϊόντος θα εξαρτηθεί από το ενδιαφέρον και τις δυνατότητες της αγοράς. Κατά τον σχεδιασμό ενός θαλάσσιου σκάφους σήμερα, είναι επωφελές να επιλέγετε μια σύγχρονη αρθρωτή πλατφόρμα κινητήρα που δίνει μια καλή βάση για μελλοντικές μετατροπές καυσίμων. Καθώς η Wärtsilä προμηθεύει επίσης συστήματα καυσίμου, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι ανάγκες του συστήματος σε πρώιμο στάδιο, προκειμένου να ανταποκριθεί στις ιδιότητες της αμμωνίας [14].

Μια πρόκληση για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι η πιθανότητα παραγωγής επιβλαβών αερίων κατά την καύση, όπως νιτρικό οξείδιο και οξέα. Αυτά τα αέρια είναι επιβλαβή για την υγεία και το περιβάλλον. Επομένως θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας καθαριστής καυσαερίων (Scrubber) για την αφαίρεση των επιβλαβών αερίων από τα καυσαέρια. Τα scrubbers λειτουργούν με την απορρόφηση των επιβλαβών αερίων σε ένα διάλυμα νερού ή άλλης ουσίας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι scrubbers που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κινητήρες αμμωνίας. Ο πιο συνηθισμένος τύπος είναι ο scrubber υγρού ψευδαργύρου. Αυτός ο τύπος scrubber χρησιμοποιεί διάλυμα ψευδαργύρου για να απορροφήσει το μονοξείδιο του άνθρακα και άλλα οξέα [14].

Η αμμωνία είναι ένα καύσιμο χωρίς άνθρακα που μπορεί ενδεχομένως να παίξει σημαντικό ρόλο στην απανθρακοποίηση της Ναυτιλίας. Παρόλο που η αμμωνία είναι τοξική και η ενεργειακή πυκνότητα είναι χαμηλότερη από τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο που χρησιμοποιούνται σήμερα, η αμμωνία είναι πιο ευνοϊκή από το υδρογόνο και μπορεί να είναι μια κατάλληλη επιλογή για μελλοντική χρήση σε πλοία μεταφοράς φορτίου με τροποποιημένους κινητήρες εσωτερικής

καύσης και δεξαμενές καυσίμων χαμηλής πίεσης. Λόγω της υψηλής τοξικότητας και διαβρωτικότητας της αμμωνίας πρέπει να υπάρχουν κατάλληλα προστατευτικά φράγματα και η επιλογή υλικού είναι υψίστης σημασίας. Ο DNV , σε συνεργασία με πολλούς ενδιαφερόμενους του κλάδου, αναπτύσσει αυτήν τη στιγμή απαιτήσεις για την ασφαλή χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου, με βάση την εμπειρία από την αμμωνία ως φορτίο και την αμμωνία ως ψυκτικό μέσο. Τέλος, η υπάρχουσα παραγωγική ικανότητα αμμωνίας πρέπει να αναπτυχθεί σημαντικά και απαιτείται παραγωγή με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή με τεχνολογία CCS, για να διασφαλιστεί ότι το περιβαλλοντικό δυναμικό της αμμωνίας να πραγματοποιηθεί. Το κόστος της πράσινης αμμωνίας είναι επί του παρόντος τουλάχιστον διπλάσιο από το κόστος του 2019 του VLSFO, και αυτό αποτελεί εμπόδιο για την απορρόφηση αυτού του καυσίμου. Το κόστος εξαρτάται κυρίως από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και το capex, που πιθανότατα θα είναι μείωση στο μέλλον [14].

Επί του παρόντος, υπάρχουν περίπου 200 δεξαμενόπλοια αερίου που μπορούν να λάβουν αμμωνία ως φορτίο και συνήθως 40 από αυτά αναπτύσσονται με φορτίο αμμωνίας ανά πάσα στιγμή. Τέτοια δεξαμενόπλοια θα είναι φυσικά υποψήφια για τους πρώτους κινητήρες με αμμωνία, καθώς έχουν ήδη το καύσιμο ως φορτίο και έχουν εμπειρία στο χειρισμό της αμμωνίας. Άλλα πλοία μεταφοράς φορτίου θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιούν αμμωνία ως καύσιμο και η εμπειρία από τέτοια πλοία θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πριν από την εισαγωγή αμμωνίας σε επιβατηγά πλοία και κρουαζιερόπλοια [19].

Κάποια από τα οφέλη της Αμμωνίας ως καύσιμο για την Ναυτιλία είναι τα παρακάτω [19]:

- **Ελάχιστες Εκπομπές CO<sub>2</sub>:** Η αμμωνία δεν περιέχει άνθρακα, και κατά την καύση της δεν παράγονται εκπομπές CO<sub>2</sub>. Αυτό συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των εκπομπών θερμοκηπίου από τα ναυτικά πλοία και στη συμμόρφωση με τους κανονισμούς αερίων θερμοκηπίου.
- **Χαμηλή Εκπομπή NO<sub>x</sub>:** Η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντίσταση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), τα οποία αποτελούν σημαντικό ρύπο στη ναυτιλία. Η χρήση αμμωνίας μειώνει αυτές τις εκπομπές σε συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.
- **Υψηλή Ενεργειακή Πυκνότητα:** Η αμμωνία έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, επιτρέποντας μακρές θαλάσσιες διαδρομές χωρίς συχνές στάσεις για επανεφοδιασμό.
- **Υφιστάμενη Υποδομή:** Η υποδομή για την παραγωγή, τη μεταφορά και την αποθήκευση αμμωνίας υπάρχει ήδη σε πολλές περιοχές, καθιστώντας ευκολότερη την ενσωμάτωση της αμμωνίας ως καυσίμου.
- **Προοπτική Παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές:** Η αμμωνία μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως το ηλιακό και το αιολικό, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της παραγωγής.

## Βιοκαύσιμα

Τα βιοκαύσιμα έχουν τη δυνατότητα να συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και το πλεονέκτημα ότι είναι ταχέως βιοαποδομήσιμα. Τα βιοκαύσιμα είναι ευέλικτα εναλλακτικά καύσιμα, καθώς μπορούν να αναμειχθούν με συμβατικά καύσιμα ή να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τεχνικές τροποποιήσεις. Ενώ πολλά έργα επίδειξης δοκιμάζουν την τεχνική σκοπιμότητα διαφορετικών βιοκαυσίμων, η κύρια πρόκληση για την υιοθέτησή τους σε μεγάλη κλίμακα είναι η δυνατότητα εξασφάλισης του απαραίτητου όγκου παραγωγής [21].

Τα βιοκαύσιμα είναι καύσιμα που παράγονται από οργανικά υλικά, συνήθως από βιομάζα ή άλλες βιολογικές πηγές. Υπάρχουν διάφοροι τύποι βιοκαυσίμων, και αυτοί περιλαμβάνουν:

- **Βιοντίζελ (Biodiesel):** Το βιοντίζελ είναι ένα καύσιμο που παράγεται από φυτικά έλαια (όπως το φοινικέλαιο και το σόγια), ζωικά λίπη, ή άλλες βιομαζικές πηγές. Συνήθως χρησιμοποιείται ως αντικατάστατο του πετρελαίου για ντίζελ κινητήρες.
- **Βιοαιθανόλη (Bioethanol):** Η βιοαιθανόλη είναι ένα καύσιμο που παράγεται από αγροτικά προϊόντα όπως το καλαμπόκι ή άλλες πηγές πλούσιες σε σάκχαρα. Συνήθως χρησιμοποιείται ως αντικατάστατο της βενζίνης σε κινητήρες εσωτερικής καύσης.
- **Βιομεθανόλη (Biomethanol):** Αντίστοιχα με τη μεθανόλη που παράγεται από ορυκτές πηγές, η βιομεθανόλη παράγεται από βιομαζικά υλικά. Χρησιμοποιείται ως καύσιμο και ως χημικό πρώτο υλικό.
- **Βιοκετόνη (Biobutanol):** Η βιοκετόνη είναι ένα καύσιμο που παράγεται από βιολογική ζύμωση, συνήθως από φυτικές πηγές. Έχει πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης ως καύσιμο για κινητήρες.
- **Βιούδα (Biogas):** Το βιούδα είναι μια ανάμειξη αερίων που παράγονται από την αναερόβια ζύμωση βιομαζικών υλικών. Περιλαμβάνει κυρίως μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα και χρησιμοποιείται για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον υπάρχουν διάφοροι τύποι βιοντίζελ που παράγονται από διάφορες πηγές πρώτων υλών [21]:

- **FAME (fatty acid methyl ester):** Το FAME παράγεται από φυτικά έλαια, ζωικά λίπη ή απόβλητα μαγειρικών ελαίων από μετεστεροποίηση, όπου τα διάφορα έλαια (τριγλυκερίδια) μετατρέπονται σε μεθυλεστέρες. Αυτό είναι το πιο ευρέως διαθέσιμο είδος βιοντίζελ στη βιομηχανία και συχνά αναμιγνύεται με κανονικό ναυτικό ντίζελ. Το πρότυπο προδιαγραφών καυσίμων πλοίων ISO 8217:2017 περιλαμβάνει πρόσθετες προδιαγραφές (βαθμοί DF) για τα αποστάγματα καυσίμων πλοίων που περιέχουν έως και 7,0 % κατ' όγκο FAME. Το FAME που χρησιμοποιείται για την ανάμειξη πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές/απαιτήσεις του EN 14214 ή ASTM D6751. FAME-Ντίζελ μείγματα με περιεκτικότητα έως και 30% BTL χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές αυτοκινήτων και αναφέρονται ως B20 ή B30.
- **FT Biodiesel:** Είναι το βιοντίζελ που παράγεται μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται σύνθεση Fischer-Tropsch (FT). Η τεχνολογία Fischer-Tropsch είναι μια ευρέως

αναγνωρισμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για να μετατρέψει διάφορα αρχικά υλικά, συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας και άλλων υλικών πλούσιων σε άνθρακα, σε υγρά καύσιμα υδρογονανθράκων όπως το βιοντίζελ.

- **HVO** Το HVO ή HDRD (ανανεώσιμο ντίζελ που προέρχεται από υδρογόνωση) είναι το προϊόν των λιπών ή των φυτικών ελαίων, μόνα τους ή αναμειγμένα με πετρέλαιο, εξευγενισμένα με μια διαδικασία υδρογονοκατεργασίας γνωστή ως υδροεπεξεργασία λιπαρών οξέων προς υδρογονάνθρακες. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται συχνά ανανεώσιμο ντίζελ για διαφοροποίηση είναι από το βιοντίζελ FAME. Η συνολική παραγωγική διαδικασία ωστόσο, είναι συνήθως πιο δαπανηρή από ό,τι για το βιοντίζελ FAME. Το HVO/HDRD είναι ένα καύσιμο που μπορεί να εισαχθεί απευθείας στις εγκαταστάσεις διανομής και ανεφοδιασμού καυσίμων καθώς και υφιστάμενους κινητήρες ντίζελ χωρίς καμία περαιτέρω τροποποίηση.
- **Βιοπροπάνιολ (Biodipropanol):** Το βιοπροπάνιολ είναι ένας βιολογικός προπανικός αλκοόλης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοντίζελ. Παράγεται συνήθως από βιομάζα ή φυτικά υλικά.
- **Βιομεθυλική Εστέρα (Biomethyl Esters):** Αυτός είναι ένας γενικός όρος που περιλαμβάνει βιοντίζελ που παράγεται από μεθυλικές εστέρες των λιπαρών οξέων, παρόμοια με το FAME, αλλά με διαφορετική χημική δομή.
- **Βιοδιζελένιο (Biodieselene):** Το βιοδιζελένιο είναι ένας νέος τύπος βιοντίζελ που παράγεται από βιομαζικά υλικά μέσω διαδικασιών όπως η πυρόλυση.

Οι διάφοροι τύποι βιοντίζελ έχουν διαφορετικές χημικές ιδιότητες και πλεονεκτήματα, και η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών και τις απαιτήσεις των εφαρμογών.

Η πρώτη ύλη και οι διαδικασίες παραγωγής που είναι διαθέσιμες καθορίζουν το ιδιότητες των βιοκαυσίμων και τη δυνατότητα εφαρμογής τους ως καύσιμα για τη ναυτιλία. Τα κύρια βιοκαύσιμα που σχετίζονται με τη θαλάσσια ναυτιλία μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις ομάδες: βιοντίζελ, βιοαλκοόλες, βιοκαύσιμα και αέρια βιοκαύσιμα. Τα βιοντίζελ και οι βιοαλκοόλες μπορούν να χρησιμεύσουν ως drop-in καύσιμα για αποστάγματα καυσίμων πλοίων. Τα βιοκαυτά πετρέλαια είναι κατάλληλα ως προϊόντα που μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα (HFO) και VLSFO και ULSFO. Τα αέρια βιοκαύσιμα (όπως το υγροποιημένο βιομεθάνιο [LBM]) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα που μπορούν να αντικαταστήσουν το υγροποιημένου φυσικό αέριο που προέρχεται από ορυκτά αέρια (LNG) [14].

Τα ίσια φυτικά έλαια (SVOs), γνωστά και ως καθαρά φυτικά έλαια (PPOs), είναι έλαια που εξάγονται από φυτά αποκλειστικά για χρήση ως καύσιμο. Αυτά τα καύσιμα δεν υποβάλλονται σε ενδιάμεσα στάδια επεξεργασίας, αλλά εισάγονται στους κινητήρες ντίζελ απευθείας από την εξαγωγή. Μελέτες έχουν δείξει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αντικαταστήσουν το IFO ή το HFO σε κινητήρες χαμηλής ταχύτητας (σε όλα τα μεγέθη μεταφορέων και φορτηγών πλοίων), αν και γενικά δεν θεωρούνται πρακτικά καύσιμα για μεγάλης κλίμακας ή μακροχρόνια χρήση. Λόγω του υψηλότερου τους ιξώδους και υψηλού σημείου βρασμού, τα SVO μειώνουν τη διάρκεια ζωής του κινητήρα λόγω της συσσώρευσης άνθρακα στο εσωτερικό του κινητήρα και της ζημιάς

που προκαλούν στο λιπαντικό του κινητήρα. Επομένως δεν συνιστάται να χρησιμοποιούνται φυτικά έλαια ως ακατέργαστο μη επεξεργασμένο καύσιμο λόγω των κινδύνων ζημιάς του κινητήρα και της ζελατινοποίησης του καυσίμου. Ορισμένοι ερευνητές έχουν επιλύσει το ζήτημα τροποποιώντας την παράδοση καυσίμου με σύστημα για προθέρμανση του SVO πριν από την έγχυση στον κινητήρα ή χρησιμοποιημένο SVO σε μείγματα με συμβατικά καύσιμα προκειμένου να μετριαστεί το πρόβλημα [21].

Το επεξεργασμένο βιοντίζελ παράγεται με μια διαδικασία που ονομάζεται μετεστεροποίηση, όπου διάφορα έλαια (τριγλυκερίδια) μετατρέπονται σε μεθυλεστέρες. Η γλυκερίνη και το νερό παράγονται ως παραπροϊόντα, τα οποία αργότερα αφαιρούνται ως ανεπιθύμητα προϊόντα. Το βιοντίζελ είναι επίσης ευρέως γνωστό ως λιπαρό οξύ μεθυλεστέρας (FAME), που λαμβάνεται από φυτικό έλαιο ή ζωικό λίπος που έχει μετεστεροποιηθεί με μεθανόλη ή αιθανόλη. Το μεθυλικό νάτριο χρησιμοποιείται συνήθως ως καταλύτης. Το FAME είναι πιο κατάλληλο καύσιμο από το SVO για κινητήρες ντίζελ, με χαμηλότερο σημείο βρασμού και ιξώδες από το SVO, που οδηγεί σε καλύτερη απόδοση του κινητήρα. Το βιοντίζελ έχει υψηλότερο σημείο ανάφλεξης (149°C) και βαθμολογία κετανίου από αυτό συμβατικό ντίζελ και διασπάται γρήγορα στο νερό. Το FAME, όμως, έχει ένα υψηλό σημείο σύννεφο το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε απόφραξη του φίλτρου και κακή ροή καυσίμου σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 32°C [14].

Το βιοντίζελ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει το MDO και το MGO σε κινητήρες ντίζελ χαμηλής έως μέσης ταχύτητας (ρυμουλκά, μικρά πλοία και φορτηγά πλοία), αν και χρησιμοποιείται πιο συχνά ως πρόσθετο καύσιμο και μπορεί να χυθεί απευθείας (drop-in) στις δεξαμενές καυσίμου. Το FAME ως καύσιμο έχει καλές ιδιότητες ανάφλεξης και λιπαντικότητας [14].

Θεωρητικά είναι δυνατή η λειτουργία οχημάτων ντίζελ με 100% FAME, αλλά απαιτεί προσαρμογές στους κινητήρες ντίζελ καθώς και έγκριση από τους κατασκευαστές κινητήρων. Ως εκ τούτου, τα μείγματα FAME έως και 20% με το πετρέλαιο ντίζελ διανέμονται ευρέως στη λιανική αγορά καυσίμων ντίζελ, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξοπλισμό ντίζελ με ελάχιστες ή καθόλου τροποποιήσεις κινητήρα [21].

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του βιοντίζελ είναι ότι αποκαθιστά τη λιπαντικότητα του κινητήρα και μειώνει τον καπνό, την αιθάλη και την οσμή καμένου ντίζελ από την εξάτμιση του κινητήρα, προστατεύοντας ταυτόχρονα από τη φθορά τις αντλίες καυσίμου και τα μπεκ. Η χρήση του FAME σε κινητήρες ντίζελ αυτοκινήτων έχει αποδειχθεί ότι μειώνουν τα οξείδια του θείου, το μονοξείδιο του άνθρακα και τα άκαυστα σωματίδια. Ωστόσο, τα προϊόντα υποβάθμισης της FAME είναι ύποπτα ότι προκαλούν ζημιά σε αντλίες καυσίμου, μπεκ και δακτυλίου εμβόλου, που οδηγεί σε όριο αριθμού οξέος στις προδιαγραφές καυσίμων πλοίων.

Το κύριο τεχνικό μειονέκτημα του βιοντίζελ σε σύγκριση με το πετρέλαιο είναι η χαμηλότερη θερμική η ενέργεια που περιέχει, καθώς το βιοντίζελ έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξυγόνο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα υδρογονανθράκων. Η υψηλότερη περιεκτικότητά του σε οξυγόνο οδηγεί επίσης σε χαμηλότερη σταθερότητα στην οξείδωση, όπου είναι πιο επιρρεπές σε

αποικοδόμηση με την πάροδο του χρόνου και σχηματίζουν υπεροξειδία, οξέα και άλλες αδιάλυτες ενώσεις. Για την έγκαιρη πρόληψη αποικοδόμησης, μπορούν να προστεθούν αντιοξειδωτικά στο μείγμα. Μια άλλη ανησυχία με τη χρήση βιοντίζελ είναι η μόλυνση του νερού που οδηγεί σε μειωμένη απόδοση καυσίμου, αυξημένη μικροβιακή ανάπτυξη και επιταχυνόμενη ζελατινοποίηση του καυσίμου σε χαμηλές θερμοκρασίες [21].

Αν και το βιοντίζελ δεν αναμειγνύεται με το νερό, είναι πολύ υδροσκοπικό. Η παρουσία των μονο- και των διγλυκερίδιων που απομένουν από την επεξεργασία του βιοντίζελ απορροφούν το νερό γρήγορα, λειτουργώντας ως γαλακτωματοποιητής για αυτό το μείγμα και καθιστά δύσκολο τον διαχωρισμό νερού από το καύσιμο. Επιπλέον, υπολειμματικά το νερό που απομένει από την επεξεργασία ή τη συμπύκνωση στις δεξαμενές αποθήκευσης αυξάνει περαιτέρω την περιεκτικότητα του καυσίμου σε νερό, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της περιεκτικότητας σε οξύ καθώς το νερό μπορεί να διευκολύνει την υδρόλυση εστέρων σε καρβοξυλικά οξέα όταν υποβάλλονται σε υψηλή θερμοκρασία ή ακραίο pH. Το νερό αυξάνει επίσης τον κίνδυνο μικροβιακής μόλυνσης, επιταχύνοντας τον σχηματισμό βιοφίλμ και μικροβιακές αποικίες που μπορούν να βλάψουν τα εξαρτήματα του συστήματος καυσίμου. Έτσι, για καθαρή χρήση diesel, η προσθήκη ενός βιοκτόνου είναι απαραίτητο για την αναστολή της βακτηριακής ανάπτυξης [21].

Η πήξη του καυσίμου συμβαίνει όταν τα μόρια συσσωματώνονται και σχηματίζουν κρυστάλλους σε χαμηλή θερμοκρασία, με αποτέλεσμα το καύσιμο να θολώνει. Με περαιτέρω ψύξη, αυτοί οι κρύσταλλοι γίνονται μεγαλύτεροι, αυξάνοντας το ιξώδες του καυσίμου και σχηματίζοντας μια γέλη ακολουθούμενη από ένα στερεό. Οι επιπλοκές της πηκτωματοποίησης προκύπτουν κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού του καυσίμου και της παράδοσης, περιορίζοντας τη χρήση του σε ψυχρές συνθήκες. Ωστόσο, είναι διαθέσιμος ένας αριθμός πρόσθετων για τη μείωση του σημείου ροής του καυσίμου και οι δεξαμενές καυσίμου μπορούν να μονωθούν και να θερμανθούν πριν από την παράδοση. Το σημείο νέφους του βιοντίζελ ποικίλλει ανάλογα με τον συνδυασμό των εστέρων στο καύσιμο και, επομένως, από τα λιπαντικά πρώτης ύλης που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του βιοντίζελ [14].

Το βιοντίζελ που παράγεται στο εμπόριο μπορεί να προέρχεται από μια ποικιλία πρώτων υλών φυτικής και ζωικής προέλευσης. Οι πρώτες ύλες φυτών περιλαμβάνουν κραιμβόσπορο (πιο κοινό στην ΕΕ), σόγια (πιο κοινό στις ΗΠΑ και Νότια Αμερική), καρύδα (κοινή στα νησιά του Ειρηνικού), φοίνικες (κοινός στη Νοτιοανατολική Ασία) και καλαμπόκι. Οι πρώτες ύλες ζωικής προέλευσης περιλαμβάνουν το λίπος (λίπος τετηγμένου βοείου ή προβάτου), τα απορρίμματα πουλερικών και άλλα ζωικά λίπη. Το χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ [22].

Οι πρώτες ύλες βιοντίζελ πρώτης γενιάς είναι γενικά δαπανηρές και διατίθενται σε περιορισμένη προσφορά, επομένως η τιμή του βιοντίζελ ποικίλλει επίσης ανάλογα με την τιμή της πρώτης ύλης. Γενικά, η προσφορά φυτικών ελαίων (φοίνικα, σόγια, canola) περιορίζεται από τον ανταγωνισμό από τις βιομηχανίες τροφίμων, επιβλαβών και καλλυντικών. Ένα σημαντικό μέρος της παραγωγής λαδιού είναι η ταυτόχρονη παραγωγή ζωοτροφών και πρωτεϊνών τροφίμων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τη σόγια και την κανόλα, που είναι και οι δύο σημαντικές πηγές φυτικής πρωτεΐνης. Ο

φοινικέλαιο, η μεγαλύτερη ελαιοκαλλιέργεια, χρησιμοποιείται κυρίως ως προϊόν διατροφής και όχι ως καύσιμο, και τα υποπροϊόντα του κομποστοποιούνται ή σε μικρότερο βαθμό χρησιμοποιούνται ως ζωοτροφές. Η παραγωγή βιοντίζελ σε όλο τον κόσμο περιορίζεται σε γεωγραφικές περιοχές με εντατική γεωργία χρήση γης σε συνδυασμό με περιφερειακά ρυθμιστικά και οικονομικά κίνητρα. Ομοίως, η πλειοψηφία των Η παραγωγή βιοντίζελ στον κόσμο προέρχεται από την ΕΕ και τις ΗΠΑ, με 28% και 24% αντίστοιχα [22].

Το παραγόμενο βιοντίζελ χρησιμοποιείται γενικά για μεταφορές αυτοκινήτων και συνήθως δεν χρησιμοποιείται 100% σε κινητήρες ντίζελ, αλλά μάλλον ως μείγμα με πετρελαϊκό ντίζελ (5-30%). Σε μείγματα 1-2%, Το βιοντίζελ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο λιπαντικό, ειδικά με το ULSD, το οποίο από μόνο του έχει κακή ιδιότητες λίπανσης. Για μείγματα υψηλότερα από 7%, πρόσθετα όπως η οκτανόλη μπορούν να προστεθούν ως συνδιαλύτης για να αποτραπεί ο διαχωρισμός φάσεων κατά την ανάμειξη [22].

Η παραγωγή θαλάσσιων βιοκαυσίμων μπορεί ενδεχομένως να ενσωματωθεί σε ένα βιοδιωλιστήριο επικεντρωμένο στην παραγωγή βιοαιθανόλης από π.χ. επεξεργασία χαρτοπολτού και χαρτιού ή λιγνοκυτταρινικά 2ης γενιάς, όπου τα υπολειμματικά απόβλητα λιγνίνης μπορούν να χρησιμεύσουν ως πρώτη ύλη για περαιτέρω αναβάθμιση καυσίμου. Η υβριδική τεχνολογία αναφέρεται στην παραγωγή καυσίμων τόσο από βιοχημικά (ζύμωση υδατανθράκων) όσο και από θερμοχημικές (θερμική αναβάθμιση λιγνίνης). Ενώ η βιοαιθανόλη δεν είναι καύσιμο σταγόνας, η υπολειμματική λιγνίνη μπορεί να μετατραπεί σε καύσιμο σταγόνας μέσω θερμικών επεξεργασιών όπως η αεριοποίηση ή η διαλυτόλυση. Κατά τη διάρκεια αυτών των θερμοχημικών διεργασιών, η υπολειμματική λιγνίνη μετατρέπεται σε ρευστά ενδιάμεσα (αέριο ή πετρέλαιο) τα οποία στη συνέχεια αναβαθμίζονται καταλυτικά σε καύσιμα υδρογονανθράκων, αναβαθμίζοντας έτσι τη λιγνίνη χαμηλής αξίας σε ένα μεταφερόμενο υγρό καύσιμο ανεφοδιασμού [14].

### Μόλυνση του Περιβάλλοντος

Εκτός από τη λογιστική του άνθρακα και τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, άλλες ατμοσφαιρικές εκπομπές υπάρχουν από τη χρήση βιοκαυσίμων. Το Διεθνές Συμβούλιο για τις Καθαρές Μεταφορές (ICCT) προσφέρει μια λεπτομερή ανασκόπηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κατάντι εκπομπές από συμβατικά καύσιμα πλοίων και πέντε βιοκαύσιμα. Οι ελάχιστες και μέγιστες μειώσεις εκπομπών για τα οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και τα σωματίδια (PM) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 (παρακάτω) [14].

| Fuel Type    | SO <sub>x</sub> | NO <sub>x</sub> |           | PM         |          |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------|------------|----------|
|              | Decrease        | Decrease        | Increase  | Decrease   | Increase |
| FAME         | 89-100%         | 29%             | 13%       | 38-90%     |          |
| HVO          | 100%            | 0% - 20%        |           | 38%        | 30%      |
| FT diesel    | 100%            | 0% - 20%        |           | 24%        | 18%      |
| Bio-methanol | 100%            | 30% - 82%       |           | 61% - 100% |          |
| DME          | 100%            |                 | 20% - 26% | 23% - 58%  |          |

Πίνακας 3.4: Εκπομπές Καυσίμων



Εκτός από τη δυνατότητα μείωσης των GHG σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων, όλα τα βιοκαύσιμα μπορούν επίσης να μειώσουν εκπομπές από την κατάντι ατμοσφαιρική ρύπανση. Τα βιοκαύσιμα χρησιμοποιούνται συχνά σε μείγματα. Ο παραπάνω πίνακας δείχνει με την χρήση 100% βιοκαυσίμου είναι δυνατή η μείωση των εκπομπών σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων, αλλά, γενικά, η δυνατότητα των μιγμάτων να μειώσουν τις εκπομπές είναι ανάλογη με το ποσοστό ανάμειξης.

Οι μειώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων οφείλονται κυρίως στη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο. Κατά συνέπεια, συνήθως υλοποιούνται με τη μορφή μειωμένων εκπομπών SO<sub>x</sub> και PM. Επειδή οι συνθήκες καύσης έχουν βελτιωθεί, ορισμένα βιοκαύσιμα προσφέρουν επίσης χαμηλότερες εκπομπές οξειδίου του αζώτου (NO<sub>x</sub>), αν και αυτό δεν ισχύει για όλα τα βιοκαύσιμα. Ο βαθμός στον οποίο μπορεί να προκύψουν τέτοιες μειώσεις εξαρτάται από τον τύπο του βιοκαυσίμου (πρώτο υλικό), τον σχεδιασμό του κινητήρα, τη διαδικασία καύσης και συνθήκες λειτουργίας. Για αυτούς τους λόγους, οι εκπομπές καυσαερίων από την καύση αυτών των καυσίμων σε κινητήρες εσωτερικής καύσης αξιολογούνται επί του παρόντος κατά περίπτωση από τους σχεδιαστές κινητήρων [14].

Η χρήση 100% FAME προσφέρει μεγαλύτερη από 90% μείωση στο SO<sub>x</sub>. Οι μειώσεις των PM είναι 38% έως 90%. Ωστόσο, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> διαφέρουν από το καύση βιοντίζελ FAME: είναι δυνατές μειώσεις έως και 29%, αλλά είναι επίσης δυνατή μια αύξηση άνω του 10%.

Το ντίζελ HVO και FT είναι βιοκαύσιμα χωρίς θείο, με αποτέλεσμα να έχουν μηδενικές εκπομπές SO<sub>x</sub> όταν εφαρμόζονται ως «σκέτο» ως καύσιμο. Χρησιμοποιώντας το ντίζελ HVO και FT σε μείγματα ή ως καθαρά καύσιμα, μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές NO<sub>x</sub> έως και 20%, ανάλογα με φορτίο και ταχύτητα κινητήρα. Ωστόσο, τα PM μπορούν να μειωθούν έως και 38%, σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων.

Υπήρξαν επίσης αναφορές όπου οι μετρήσεις καυσαερίων κατέγραψαν αυξήσεις στα PM έως και 30% σε σύγκριση με καύσιμα πλοίων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Το DME και η μεθανόλη (συμπεριλαμβανομένων των εναλλακτικών τους με βιολογική βάση) είναι επίσης καύσιμα χωρίς θείο, με αποτέλεσμα μηδενικό SO<sub>x</sub> εκπομπών. Οι δοκιμές εκπομπών κινητήρων πλοίων που καίνε DME έχουν περιοριστεί, αλλά οι μειώσεις PM σχεδόν κατά 60% είναι δυνατόν. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> μπορούν να αυξηθούν σε χαμηλότερα φορτία κινητήρα, αλλά είναι δυνατές σημαντικές μειώσεις σε υψηλότερα φορτία και υψηλότερα κλάσματα μείγματος DME. Η μεθανόλη μπορεί να μειώσει τις εκπομπές PM κατά 60% έως 100%. Η χρήση LNG γενικά μειώνει τα NO<sub>x</sub>, PM και (για πλοία) SO<sub>x</sub> περισσότερο από 75%. Το βιομεθάνιο προσφέρει το ίδιο πλεονεκτήματα. Το δυναμικό μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των βιοκαυσίμων είναι σημαντικό και μπορεί να βοηθήσει στην απανθρακοποίηση της Ναυτιλίας [14].

Τα βιοκαύσιμα που προέρχονται από καλλιέργειες τροφίμων και ζωοτροφών ή από ξυλώδη βιομάζα μπορούν επίσης να επηρεάσουν αρνητικά το περιβάλλον (για παράδειγμα, την βιοποικιλότητα και τα αποθέματα άνθρακα) όταν δεν πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια βιωσιμότητας. Ως αποτέλεσμα των συζητήσεων της ILUC, οι αρχές προσπαθούν να στραφούν

από τα βιοκαύσιμα που προέρχονται από τρόφιμα και ζωοτροφές σε προηγμένα βιοκαύσιμα από απόβλητα και υπολείμματα, κυρίως ξυλώδη βιομάζα. Ωστόσο, η ξυλώδης βιομάζα δεν είναι αυτόματα βιώσιμη. Υπήρξε μεγάλη κλίμακας ζήτηση για ξυλώδη βιομάζα από όλους τους τομείς από την εμφάνιση της «βιοοικονομίας», ασκώντας το είδος της πίεσης στις πρακτικές διαχείρισης των δασών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε κακή διατήρηση, και ανησυχίες για τη βιοποικιλότητα. Η παρακολούθηση και η ποιότητα των στατιστικών πρέπει να βελτιωθούν σημαντικά για να διασφαλιστεί ότι τα υπολείμματα βιομάζας που εξορύσσονται από δάση δεν έχουν ως αποτέλεσμα ευρύτερες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αποξήλωση των δασών. Συνολικά, οι τρέχουσες συζητήσεις για τα βιώσιμα βιοκαύσιμα τείνουν να ευνοούν την ξυλώδη βιομάζα και άλλα απόβλητα και υπολείμματα, αλλά υπάρχουν πολλά άλυτα ζητήματα, στα οποία οι επιστήμονες και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής δεν συμφωνούν. Από την άποψη της ποιότητας του αέρα, τα περισσότερα βιοκαύσιμα δεν περιέχουν θείο ή μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές θείου. Το FAME και το bio-DME μπορούν είτε να μειώσουν είτε να αυξήσουν τις εκπομπές NOx, ανάλογα με τα φορτία του κινητήρα. Άλλα βιοκαύσιμα μπορεί να οδηγήσουν σε μέτριες μειώσεις των εκπομπών NOx ή έως και 82% στην περίπτωση της βιομεθανόλης [21].

Τα βιοκαύσιμα στη ναυτιλία προσφέρουν αρκετά οφέλη, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν θετικά τον τομέα. Ορισμένα από αυτά τα οφέλη περιλαμβάνουν [14]:

- i. **Μείωση των Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου:** Τα βιοκαύσιμα συνήθως παράγουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και άλλα επιβλαβή αέρια σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Αυτή η μείωση εκπομπών συμβάλλει στην αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών.
- ii. **Βελτιωμένη Ποιότητα του Αέρα:** Η χρήση βιοκαυσίμων μπορεί να μειώσει τις εκπομπές περιβαλλοντικά επιβλαβών ουσιών, όπως τα θεία αέρια και τα σωματίδια, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του αέρα στις περιοχές κοντά στους λιμένες και τις ακτές.
- iii. **Προώθηση της Βιωσιμότητας:** Η χρήση βιοκαυσίμων ενθαρρύνει τη βιώσιμη γεωργία και την παραγωγή βιομάζας. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικά οφέλη για τις αγροτικές κοινότητες και την ανάπτυξη βιοτεχνολογικών τομέων.
- iv. **Μείωση της Εξάρτησης από τα Ορυκτά Καύσιμα:** Η ναυτιλία μπορεί να μειώσει την εξάρτησή της από τα πετρελαϊκά καύσιμα και τις ενέργειες που σχετίζονται με την απόσταξη του πετρελαίου από το εξωτερικό.
- v. **Προστασία των Θαλάσσιων Οικοσυστημάτων:** Η χρήση βιοκαυσίμων μειώνει τον κίνδυνο διαρροής πετρελαίου στα θαλάσσια οικοσυστήματα σε περίπτωση ατυχημάτων πλοίων.
- vi. **Προώθηση της Καινοτομίας:** Η ανάπτυξη και η χρήση βιοκαυσίμων στη ναυτιλία ενθαρρύνουν την καινοτομία στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και διεργασιών παραγωγής.

Τα βιοκαύσιμα στη ναυτιλία αποτελούν μια προοδευτική επιλογή που συμβάλλει στην προσπάθεια μείωσης των επιπτώσεων του τομέα στο περιβάλλον και στην αειφόρο ανάπτυξη.

Η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) εξαρτάται από την πηγή και τη διαδικασία παραγωγής των βιοκαυσίμων. Κάθε τύπος βιοκαυσίμου μπορεί να έχει διαφορετικό αποτύπωμα εκπομπής CO<sub>2</sub> [14]. Εν γένει:

- **Βιοντίζελ (Biodiesel):** Η παραγωγή και η χρήση βιοντίζελ μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με το παραδοσιακό πετρέλαιο ντίζελ. Αυτό συμβαίνει επειδή τα φυτικά ελαία που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για το βιοντίζελ αναστέλλουν τον κύκλο του CO<sub>2</sub> καθώς αυξάνουν την ανάπτυξη των φυτών.
- **Βιοαιθανόλη (Bioethanol):** Η παραγωγή βιοαιθανόλης από φυτικά υλικά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Όπως και στην περίπτωση του βιοντίζελ, η φυτική ανάπτυξη απορροφά CO<sub>2</sub> κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του βιοαιθανόλη.
- **Βιομεθανόλη (Biomethanol):** Η παραγωγή βιομεθανόλης από βιομαζικά υλικά επίσης μπορεί να είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σχέση με το μεθανόλη που παράγεται από ορυκτές πηγές, αν η παραγωγή γίνεται με βιώσιμο τρόπο.

Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> δεν είναι μόνο από την παραγωγή των βιοκαυσίμων αλλά και από την υποδομή, τη μεταφορά και την αποθήκευσή τους. Συνεπώς, η ολική εκπομπή CO<sub>2</sub> εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και τις πρακτικές παραγωγής και χρήσης των βιοκαυσίμων.

Τα βιοκαύσιμα που παραμένουν αποθηκευμένα για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να υποστούν μια σειρά από αλλαγές. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα και την απόδοση των βιοκαυσίμων, καθώς και τον κίνδυνο δηλητηρίασης. Οι κύριες αλλαγές που μπορεί να συμβούν στα βιοκαύσιμα κατά την αποθήκευση είναι οι εξής [14]:

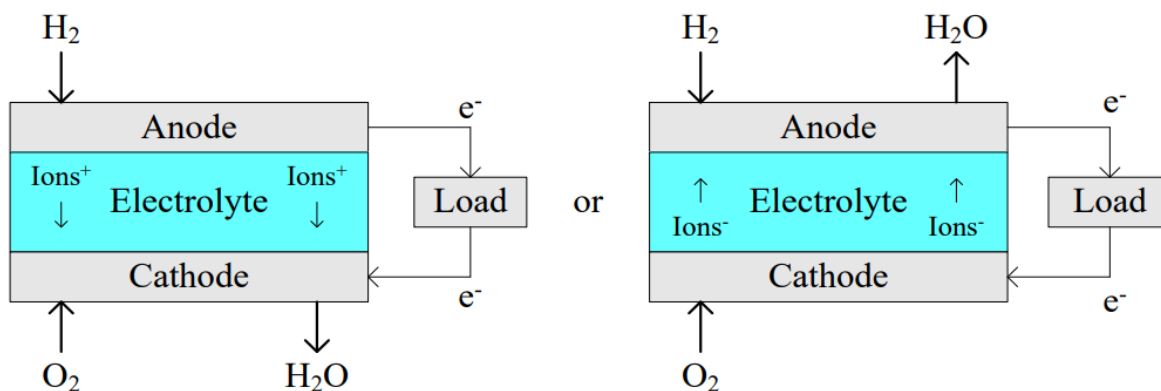
- **Οξείδωση:** Η οξείδωση είναι μια χημική αντίδραση κατά την οποία το οξυγόνο συνδυάζεται με ένα άλλο μόριο. Στην περίπτωση των βιοκαυσίμων, η οξείδωση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της περιεκτικότητας σε ενέργεια και σε αύξηση της περιεκτικότητας σε οξυγόνο.
- **Υδρόλυση:** Η υδρόλυση είναι μια χημική αντίδραση κατά την οποία το νερό συνδυάζεται με ένα άλλο μόριο. Στην περίπτωση των βιοκαυσίμων, η υδρόλυση μπορεί να οδηγήσει σε διάσπαση των μορίων του καυσίμου και σε μείωση της περιεκτικότητας σε ενέργεια.
- **Βιοτροποποίηση:** Η βιοτροποποίηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα βακτήρια ή άλλα μικροοργανισμοί μετατρέπουν τα μόρια του καυσίμου. Στην περίπτωση των βιοκαυσίμων, η βιοτροποποίηση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της περιεκτικότητας σε ενέργεια και σε αύξηση της περιεκτικότητας σε ακαθαρσίες.

Οι αλλαγές που συμβαίνουν στα βιοκαύσιμα κατά την αποθήκευση μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα και την απόδοση των βιοκαυσίμων, καθώς και τον κίνδυνο δηλητηρίασης [14].

- **Μείωση της ποιότητας:** Οι αλλαγές στα βιοκαύσιμα μπορεί να οδηγήσουν σε μείωση της περιεκτικότητας σε ενέργεια, σε αύξηση της περιεκτικότητας σε ακαθαρσίες και σε αλλαγές στην οσμή, τη γεύση και την εμφάνιση. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση του κινητήρα και να αυξήσουν τον κίνδυνο βλάβης του κινητήρα.
- **Αύξηση του κινδύνου δηλητηρίασης:** Οι αλλαγές στα βιοκαύσιμα μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση της τοξικότητας των βιοκαυσίμων. Αυτό μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο δηλητηρίασης από βιοκαύσιμα, εάν τα βιοκαύσιμα καταναλωθούν ή εισπνευστούν.

### 3.5.2. Κυψέλες Καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου (Fuel Cell) είναι ένα ηλεκτροχημικό στοιχείο που αποτελείται από μία άνοδο, μία κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη και μετατρέπει τη χημική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα καύσιμο (π.χ. υδρογόνο ή μεθανόλη) και το οξυγόνο σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Ένα βασικό σχηματικό το διάγραμμα μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα, όπου οι δύο εικόνες απεικονίζουν τα διαφορετικά πιθανά χαρακτηριστικά μεταφοράς ιόντων στον ηλεκτρολύτη ανάλογα με το τύπος κυψέλης καυσίμου [23].



Σχήμα 3.3: Βασικό σχηματικό διάγραμμα μιας κυψέλης καυσίμου τύπου υδρογόνου

Μόνο ένα πολύ μικρό ηλεκτρικό δυναμικό, περίπου 0,7 βολτ (V), παράγεται από μία μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου. Ως εκ τούτου, οι κυψέλες τοποθετούνται σε σειρά για να δημιουργήσουν επαρκή τάση για να συναντήσουν την απαίτηση μιας εφαρμογής, με αποτέλεσμα μια «στοίβα κυψελών καυσίμου».

Οι τύποι κυψελών καυσίμου κατηγοριοποιούνται γενικά με βάση τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας διαφοροποίησης είναι ο τύπος του πρωτογενούς καυσίμου. Παρακάτω αναλύονται οι τύποι των κυψελών καυσίμου [23].

- i. **AFC (αλκαλική κυψέλη καυσίμου).** Το AFC αποτελεί μια κυψέλη καυσίμου σχετικά χαμηλού κόστους. Το μόνο προϊόν της αντίδρασης είναι το νερό και δεν υπάρχουν άλλες εκπομπές. Ωστόσο, η δηλητηρίαση από CO<sub>2</sub> είναι μια σημαντική ανησυχία καθώς το CO<sub>2</sub> θα μπορούσε να αντιδράσει με τον αλκαλικό ηλεκτρολύτη. Ως εκ τούτου, απαιτούνται καθαρό υδρογόνο και καθαρό οξυγόνο (O<sub>2</sub>), που σημαίνει ότι δεν συνιστώνται άλλα καύσιμα και αέρας λόγω των σημαντικών μέτρων καθαρισμού που απαιτούνται.
- ii. **PEMFC.** Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των PEMFC επιτρέπει την ευέλικτη και ασφαλή λειτουργία, λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις υλικού και γρήγορη εκκίνηση. Ωστόσο, η χαμηλή θερμοκρασία οδηγεί επίσης σε έλλειψη επιλογών ανάκτησης απόβλητης θερμότητας και σε ένα περίπλοκο σύστημα για την διαχείριση του νερού. Η πολυπλοκότητα του τελευταίου ζητήματος δεν πρέπει να υποτιμηθεί, καθώς η ύγρανση της παροχής αέρα και η απομάκρυνση της περίσσειας νερού από την κάθοδο δημιουργούν

- προκλήσεις. Επιπλέον, οι καταλύτες πλατίνας αυξάνουν το κόστος του συστήματος και μπορούν να δηλητηριαστούν από το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το θείο (S) με μέτρια ευαισθησία. Ως εκ τούτου, μια μονάδα αναμόρφωσης και καθαρισμού είναι απαραίτητη για την επίτευξη της απαιτούμενης καθαρότητας υδρογόνου εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα υδρογονάνθρακες και όχι καθαρό υδρογόνο.
- iii. **HT-PEMFC.** Εκτός από τη συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας PEMFC για τη βελτίωση της λειτουργικής ευελιξίας, την παράταση της διάρκειας ζωής και τη μείωση του κόστους, η ανάπτυξη συστημάτων PEMFC υψηλής θερμοκρασίας είναι επίσης ένας τομέας ερευνητικού ενδιαφέροντος. Σε σύγκριση με το PEMFC, το HT-PEMFC χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρολύτη ορυκτού οξέος αντί για έναν ηλεκτρολύτη με βάση το νερό. Έτσι, μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασία έως 200 °C. Λόγω αυτής της υψηλότερης θερμοκρασίας, το HT-PEMFC είναι λιγότερο ευαίσθητο στη δηλητηρίαση από το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το θείο (S) και δεν υπάρχει ανάγκη διαχείρισης του νερού. Επιπλέον, ένα σύστημα ανάκτησης της απορριπτόμενης θερμότητας (WHR) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν κύκλο πυθμένα για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.
- iv. **PAFC (κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος).** Το PAFC έχει μέτριο κόστος και λειτουργεί σε θερμοκρασίες έως 200 °C. Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών, άλλα καύσιμα εκτός από το καθαρό υδρογόνο (υδρογονάνθρακες όπως το LNG και η μεθανόλη) μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ενώ μπορεί να συμπεριληφθεί τόσο μια μονάδα αναμόρφωσης όσο και ένα σύστημα WHR (συνήθως ένας ατμοστρόβιλος). Κατά συνέπεια, ενώ το προϊόν της ηλεκτροχημικής αντίδρασης είναι νερό, η διαδικασία αναμόρφωσης παράγει CO<sub>2</sub>. Η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας καθιστά τον καταλύτη πλατίνας λιγότερο ευαίσθητο στη δηλητηρίαση από CO και σε άλλους ρύπους.
- v. **DMFC.** Σε σύγκριση με το PEMFC, το DMFC έχει ελαφρώς υψηλότερο κόστος και χαμηλότερη απόδοση, αλλά έχει το πλεονέκτημα ότι η υγρή μεθανόλη είναι πολύ πιο εύκολη στον χειρισμό από το υδρογόνο. Η χρήση μεθανόλης ως καυσίμου οδηγεί σε εκπομπές CO<sub>2</sub> αλλά όχι σε εκπομπές NO<sub>x</sub>. Η κύρια πρόκληση με το DMFC είναι ότι η μεθανόλη διασχίζει τη μεμβράνη στην κάθοδο και αντιδρά απευθείας με το οξυγόνο, οδηγώντας σε χαμηλή απόδοση. Έτσι, η προϋπόθεση της εφαρμογής DMFC είναι για τη βελτίωση της απόδοσης της μεμβράνης, η οποία θα διευκόλυνε την αυξημένη απόδοση και ικανότητα ισχύος της προκύπτουσας στοιβάς κυψελών καυσίμου.
- vi. **MCFC.** Το MCFC έχει σχετικά υψηλό κόστος και λειτουργεί σε θερμοκρασίες στην περιοχή 600–700 °C. Λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας, εκτός του καθαρού υδρογόνου και άλλα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως το LNG, η μεθανόλη και οι υδρογονάνθρακες. Όταν το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο δεν υπάρχουν εκπομπές CO<sub>2</sub>, το διοξείδιο του άνθρακα κυκλοφορεί μόνο στις κυψέλες καυσίμου για την αναγέννηση του ανθρακικού άλατος στον ηλεκτρολύτη. Επιπρόσθετα, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας υπαγορεύουν ότι ένα σύστημα WHR είναι επίσης κατάλληλο για MCFC. Η χρήση υδρογονανθράκων ως καύσιμο οδηγεί σε εκπομπές CO<sub>2</sub>, αλλά δεν υπάρχουν εκπομπές NO<sub>x</sub> καθώς δεν υπάρχει αέρας όταν πραγματοποιείται η αναμόρφωση στην άνοδο. Ωστόσο, πιθανές εκπομπές NO<sub>x</sub> ενδέχεται να υπάρχουν από τα επόμενα συστήματα του WHR. Το MCFC είναι μια κυψέλη καυσίμου υψηλής απόδοσης, με

καταλύτη και ηλεκτρολύτες χαμηλού κόστους και υψηλή ευελιξία σε καύσιμα και ρύπους. Ενώ η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας το καθιστά κατάλληλο για συστήματα ανάκτησης ενέργειας, καθιστά επίσης τα συστήματα MCFC ευάλωτα σε αρνητικά αποτελέσματα κύκλου όπως διάβρωση και ρωγμές εξαρτημάτων. Το MCFC έχει αργή εκκίνηση και είναι λιγότερο ευέλικτο προς τις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ισχύος από τις κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας. Ο συνδυασμός MCFC με μπαταρίες/υπερπυκνωτές ή με ηλεκτρόλυση για πιο σταθερή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά την καταπόνηση από τον θερμικό κύκλο. Αυτό θα μπορούσε επίσης να επιτρέψει πιο ευέλικτη λειτουργία με ταχύτερη εκκίνηση και τη δυνατότητα κάλυψης της απαίτησης για μεταβαλλόμενη ισχύ. Οι MCFC είναι εμπορικά διαθέσιμοι, αλλά εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν υψηλό κόστος, περιορισμένη διάρκεια ζωής και χαμηλή πυκνότητα ισχύος.

- vii. **SOFC.** Σε αντίθεση με ένα MCFC, δεν απαιτείται CO<sub>2</sub> να κυκλοφορήσει στην κάθοδο ενός SOFC. Τα SOFC έχουν σχετικά υψηλό κόστος και λειτουργούν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ τους 500–1000 °C. Λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας, υδρογονάνθρακες με άμεση εσωτερική αναμόρφωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα, όπως το LNG και η μεθανόλη, και η άμεση θερμική πυρόλυση αμμωνίας (NH<sub>3</sub>) σε μια στοιβία SOFC. Εν τω μεταξύ, ένα σύστημα WHR είναι επίσης κατάλληλο για SOFC, και όπως στο MCFC η υψηλή θερμοκρασία καθιστά το SOFC ευάλωτο στις αρνητικές επιπτώσεις του κύκλου. Παρά τη σταθερότητα του σωληνοειδούς SOFC όσον αφορά τα αποτελέσματα θερμικού κύκλου, το επίπεδο SOFC είναι πιο ευνοϊκό λόγω της υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας και της ευκολότερης κατασκευής. Ο συνδυασμός ενός SOFC με μια μπαταρία θα μειώσει τη θερμική καταπόνηση και θα εξασφαλίσει επίσης μια πιο ευέλικτη λειτουργία.

### **Χρήση στην Ναυτιλία**

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι γνωστά για τα πλεονεκτήματά τους όπως χαμηλός θόρυβος, καθόλου ή σχεδόν καθόλου εκπομπές NO<sub>x</sub> και η υψηλή απόδοση στην περιοχή χαμηλής ισχύος. Επιπλέον, είναι αρθρωτού σχεδιασμού, γεγονός που οδηγεί σε οφέλη για την ενσωμάτωσή τους. Τα μεγάλα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι το υψηλό κόστος τους, ανεξάρτητα από τον τύπο κυψελών καυσίμου και η χαμηλή ειδική ισχύς, τα οποία είναι περισσότερο ή λιγότερο έντονα σε όλους τους τύπους κυψελών καυσίμου. Η διάρκεια ζωής μιας στοιβίας κυψελών καυσίμου είναι σήμερα επίσης ένα μεγάλο ζήτημα για τους περισσότερους τύπους κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η υλικοτεχνική υποστήριξη των καυσίμων και η τιμή των καυσίμων αποτελούν εμπόδια για την εισαγωγή της τεχνολογίας. Το καθαρό υδρογόνο που είναι το προτιμώμενο καύσιμο από τεχνική άποψη δεν είναι ευρέως διαδεδομένο. Υπάρχουν μόνο λίγα πρατήρια καυσίμων, και ακόμη λιγότερο για ναυτιλιακές εφαρμογές [14].

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, ειδικά σε εφαρμογές με υψηλή ισχύ απαιτείται διαφορετικό καύσιμο από το υδρογόνο, σύμφωνα με το γεγονός της χαμηλής ογκομετρικής ενεργειακής περιεκτικότητας του υδρογόνου. Ο απαιτούμενος όγκος για το καύσιμο γίνεται ο πιο περιοριστικός παράγοντας για τα αέρια ως εναλλακτικά καύσιμα στη ναυτιλία. Τα καύσιμα εκτός

του υδρογόνου απαιτούν συστήματα αναμόρφωσης που πρέπει να εφαρμόζονται με τις κυψέλες καυσίμου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων αναμόρφωσης, αλλά η μεγαλύτερη πρόκληση για αυτούς είναι να απαλλαγούν από το θείο, ειδικά στα τυπικά ναυτιλιακά καύσιμα. Παρόλα αυτά συνεχίζονται οι αλλαγές στους διεθνείς κανονισμούς και έχει επιτρέψει η χρήση φυσικού αερίου από τα μέσα του 2010 και οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις σχετικά με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο στα καύσιμα καυσίμων που θα υποστηρίξουν τη χρήση συστημάτων αναμόρφωσης στο μέλλον [14].

Ωστόσο, σε περιφερειακές εφαρμογές με σχετικά χαμηλή ζήτηση ισχύος, όπως φέρι μποτ ή σκάφη αναψυχής, μπορεί να είναι δυνατό να δημιουργηθεί επαρκής ανεφοδιασμός καυσίμων με ένα πρατήριο καυσίμων.

Ο IMO έχει ξεκινήσει την ανάπτυξη ενός διεθνούς κώδικα που θα επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών καυσίμων αερίων και μπορεί επίσης να είναι υγρά καύσιμα με σημείο ανάφλεξης κάτω από 60°C. Αυτές οι εξελίξεις θα υποστηρίξουν επίσης τη χρήση συστημάτων κυψελών καυσίμου στη διεθνή ναυτιλία [24].

Μεταξύ των επτά τύπων κυψελών καυσίμου, υπάρχουν διαφορές στην απόδοση από άποψη τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικά ζητήματα, καθώς και η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας στα πλοία, συνήθως εξετάζονται. Ωστόσο, είναι δύσκολο να επιλέξουμε τα πολλά υποσχόμενα μονοπάτια με βάση έναν μεμονωμένο δείκτη. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται συνήθως μια προσέγγιση λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων ή η διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας, όπου τα PEMFC/HT-PEMFC, MCFC και SOFC θεωρούνται οι πιο υποσχόμενοι τύποι κυψελών καυσίμου για ναυτιλιακές εφαρμογές.

Αναμένεται ότι η παραγωγή ενέργειας θα γίνει η πιο εφικτή εφαρμογή για FC σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, κυρίως λόγω του περιορισμένου μεγέθους τους και της παραδοθείσας ισχύος τους. Κατά συνέπεια, οι κυψέλες καυσίμου δεν είναι επί του παρόντος κατάλληλες ως κύρια πηγή ενέργειας για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Το τρέχον κανονιστικό πλαίσιο αποτελείται από κανόνες DNV και ένα σχέδιο ενδιάμεσης κατευθυντήριας γραμμής που εγκρίθηκε στον IMO το 2021 [14].

Αυτή η κατευθυντήρια γραμμή δημιουργήθηκε στο πλαίσιο των τροποποιήσεων στον Κώδικα IGF5, ο οποίος θα είναι η κύρια νομοθετική πράξη που θα ρυθμίζει τις ρυθμίσεις των FC με την κύρια καύσιμα.

Οι μελλοντικές προοπτικές των κυψελών καυσίμου μπορούν να αξιολογηθούν και να αναλυθούν με βάση ένα πολυδιάστατο πλαίσιο που λαμβάνει υπόψη τους τεχνολογικούς δείκτες, το οικονομικό κόστος, τις περιβαλλοντικές επιδόσεις και τις κοινωνικές επιπτώσεις. Η εξαιρετική απόδοση από την άποψη της κλιματικής αλλαγής και των τοπικών εκπομπών είναι τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου και δεν υπάρχουν σημαντικές ανησυχίες του κοινού. Κατά συνέπεια, περιβαλλοντικοί και κοινωνικοί παράγοντες δεν είναι οι κύριοι παράγοντες που περιορίζουν την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου στον

ναυτιλιακό τομέα. Ως εμπορεύσιμο θαλάσσιο σύστημα ενέργειας, η ικανότητα ισχύος, η ασφάλεια, η αξιοπιστία, η ανθεκτικότητα, η λειτουργικότητα και το κόστος είναι σημαντικοί παράγοντες που χρειάζονται περισσότερη προσοχή [24].

**Ικανότητα Ισχύος.** Οι απαιτήσεις ισχύος για θαλάσσια συστήματα ισχύος κυμαίνονται από μερικά kW έως δεκάδες MW. Επί του παρόντος, η μέγιστη ισχύς εξόδου των κυψελών καυσίμου είναι μόνο μερικά MW. Το δυναμικό των κυψελών καυσίμου για χρήση σε εφαρμογές εμπορικής ναυτιλίας είναι περιορισμένες όσον αφορά την ισχύ εξόδου. Ως αποτέλεσμα, τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου γίνονται αντιληπτά μέσω της χρήσης σε APU, καθώς και σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για εσωτερική και θαλάσσια ακτοπλοΐα μικρών αποστάσεων. Η μέγιστη χωρητικότητα ισχύος και οι συνολικές επιδόσεις θα μπορούσαν να βελτιωθούν περαιτέρω με συνδυασμό με μπαταρίες, σύμφωνα με την υπάρχουσα επιχειρησιακή εμπειρία. Ωστόσο, μέσω της δημιουργίας υβριδικών συστημάτων σε συνδυασμό με στροβιλομηχανές, κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, όπως MCFC και SOFC, παρουσιάζουν επίσης τη δυνατότητα να παρέχουν προωθητική ισχύ για μεγαλύτερα θαλάσσια πλοία αντί να συνεισφέρουν απλώς βοηθητική ισχύ. Αν και ένα GT από μόνο του δεν έχει ανταγωνιστικότητα για πρόωση σε περιβάλλον εμπορικού ναυτικού λόγω της σχετικά χαμηλής απόδοσης, η συνολική απόδοση του συστήματος των συστημάτων συμπαραγωγής και τριπλής παραγωγής που συνδυάζουν κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, μονάδες GT και εγκαταστάσεις HVAC υποστηρίζεται ότι είναι έως και 70-85%. Βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος μεταξύ κυψελών καυσίμου και GT, εξαγωγή κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου και κατανομή ισχύος ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας μεταξύ των μονάδων κυψελών καυσίμου και μπαταριών είναι οι επικτές οδοί για την αύξηση της ισχύος εξόδου χωρίς να διακυβεύεται η συνολική απόδοση. Επιπλέον, η σπονδυλοποίηση είναι μια σημαντική οδός για την αύξηση της συνολικής ισχύος των εγκαταστάσεων, η οποία είναι παρόμοια με τις τράπεζες μπαταριών [14].

**Ασφάλεια.** Η ασφαλής λειτουργία των συστημάτων ισχύος επί των πλοίων είναι υψίστης σημασίας. Η ασφάλεια των συστημάτων ισχύος κυψελών καυσίμου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την επιλογή του καυσίμου, βασικά ζητήματα που σχετίζονται με την πυκνότητα του καυσίμου, το σημείο ανάφλεξης, τη θερμοκρασία αυτανάφλεξης, τα όρια ευφλεκτότητας, τοξικότητα, κ.λπ. Επιπλέον, κατά τη διαχείριση των κινδύνων θα πρέπει να καλύπτονται διαφορετικά σενάρια εργασίας, όπως ανεφοδιασμός καυσίμων, αποθήκευση επί του σκάφους, καθημερινή εξυπηρέτηση και απόκριση έκτακτης ανάγκης. Εστιάζοντας στο υδρογόνο, την αμμωνία, το μεθάνιο και τη μεθανόλη, τα αεροστεγή περιβλήματα αγωγών και στοιβών κυψελών καυσίμου, η πλεονάζουσα παρακολούθηση για διαρροές, ο τερματισμός λειτουργίας έκτακτης ανάγκης για συστήματα και ο γρήγορος εξαερισμός καυσίμων που διαρρέουν στην ατμόσφαιρα είναι απαραίτητα μέτρα μετριασμού του κινδύνου για αυτά τα αέρια ή χαμηλού σημείου ανάφλεξης καύσιμα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για την αμμωνία και τη μεθανόλη που μπορεί να είναι ελαφρώς τοξικά και επικίνδυνα για τον άνθρωπο σε κάποιο βαθμό. Διεθνείς ναυτικοί κανονισμοί και κανόνες ταξινόμησης. Τα περιβάλλοντα συστήματα ισχύος κυψελών καυσίμου επί του παρόντος απουσιάζουν. Παρόλο που ο Διεθνής Κώδικας Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν Αέρια ή Άλλα Καύσιμα Χαμηλού Σημείου Ανάφλεξης (IGF Code) παρέχει κάποια αναφορά, λεπτομερείς κανονισμούς, κανόνες ταξινόμησης και επιχειρησιακές οδηγίες που



στοχεύουν τα καύσιμα. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής κυψέλης εξαρτώνται από τη συσσώρευση πολλών εμπειριών δοκιμών και επίδειξης. Η επίσημη αξιολόγηση ασφάλειας και η διαχείριση ασφάλειας βάσει κινδύνου είναι τα σημαντικά εργαλεία και αρχές για τους σχεδιαστές συστημάτων, τους διαμορφωτές κανόνων και τους χειριστές πλοίων [24].

**Αξιοπιστία.** Η αξιοπιστία των συστημάτων ισχύος κυψελών καυσίμου εξαρτάται αφενός από την απρόσκοπτη λειτουργία τους και από την άλλη, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των καυσίμων. Η απουσία πρωτογενών μηχανικών κινήτων μερών καθιστά τις κυψέλες καυσίμου σχετικά αξιόπιστες, ειδικά για κυψέλες καυσίμου με χαμηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με μέτριες συνθήκες εργασίας. Ωστόσο, για τα συστήματα ισχύος MCFC και SOFC, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και τα φαινόμενα ανακύκλωσης λόγω αλλαγών στο φορτίο καθιστούν τη στοίβα κυψελών καυσίμου ευάλωτη, με την πιθανότητα αστοχίας να αυξάνεται περαιτέρω κατά την εισαγωγή ολοκληρωμένης μονάδας αναμόρφωσης καυσίμου και μονάδες WHR. Επομένως, ο σχεδιασμός περιττών συστημάτων και εξαρτημάτων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να αποφευχθεί η πλήρης απώλεια ισχύος λόγω αστοχιών ενός σημείου. Εκτός από τη βελτίωση της αξιοπιστίας συστημάτων και εξαρτημάτων, οι τράπεζες μπαταριών θεωρούνται βιώσιμες επιλογές για την εξάλειψη των διακυμάνσεων του φορτίου των κυψελών καυσίμου για την αποφυγή αρνητικών επιπτώσεων του κύκλου. Επιπλέον, οι κατάλληλες στρατηγικές ελέγχου είναι το κλειδί για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των συστημάτων [14].

Η διαθεσιμότητα καυσίμου εξαρτάται από την υποδομή, η οποία είναι ένα από τα κύρια εμπόδια για την αποστολή χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Λαμβάνοντας υπόψη καθαρά οικονομικά συμφέροντα, δεν υπάρχει κανένα κίνητρο στην αγορά για υποδομές δεδομένου ότι υπάρχουν πολύ λίγα πλοία που τροφοδοτούνται με καύσιμα φιλικά προς το περιβάλλον σε λειτουργία. Με τη σειρά του, υπάρχει μικρό κίνητρο για πλοία που κινούνται με κυψέλες καυσίμου, καθώς υπάρχει πολύ μικρή υποδομή για ανεφοδιασμό καυσίμων. Ως εκ τούτου, τα νομικά πλαίσια και τα κίνητρα πολιτικής στην ναυτιλιακή κοινότητα, σε παγκόσμιο, περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο, θα πρέπει να εφαρμοστεί. Επί του παρόντος, αυτό παραμένει ένα σημαντικό εμπόδιο στην ευρεία υιοθέτηση κυψελών καυσίμου. Ωστόσο, οι ολοένα και πιο αυστηροί στόχοι που επιβάλλονται από τον IMO και ο απώτερος στόχος των καθαρών μηδενικών εκπομπών άνθρακα θα οδηγήσουν σε αλλαγές τα επόμενα χρόνια [14].

**Λειτουργικότητα.** Η λειτουργικότητα θα μπορούσε να αντικατοπτρίζεται από τον χρόνο εκκίνησης και την παροδική δυναμική απόκριση. Λαμβάνοντας υπόψη τη στοίβα κυψελών καυσίμου, ο χρόνος εκκίνησης κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα για ένα PEMFC έως δεκάδες λεπτά για ένα SOFC, καθώς οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας χρειάζονται περισσότερο χρόνο για προθέρμανση στοίβας και αναμορφωτή. Ωστόσο, για ναυτιλιακές εφαρμογές, ο μεγάλος χρόνος εκκίνησης δεν θεωρείται σημαντικό ελάττωμα και θα μπορούσε να γίνει αποδεκτό σε κάποιο βαθμό. Άλλωστε κανονικά απαιτούνται αρκετές ώρες για την αναμονή των κινητήρων μεγάλων ναυτιλιακών πλοίων που κινούνται με κινητήρες ντίζελ επί του παρόντος. Τα χαρακτηριστικά δυναμικής απόκρισης αντικατοπτρίζουν την απόκριση των συστημάτων ισχύος κυψελών καυσίμου σε αλλαγές εξωτερικού φορτίου. Ο μεταβατικός χρόνος απόκρισης κυμαίνεται από λιγότερο από 10 δευτερόλεπτα για το PEMFC έως τα 15 λεπτά για το SOFC. Εν τω μεταξύ,

ο μεταβατικός χρόνος απόκρισης των συστημάτων αναμόρφωσης είναι συνήθως λίγα λεπτά. Ως εκ τούτου, για αυτόνομα συστήματα κυψελών καυσίμου, οι μπαταρίες ή οι υπερπυκνωτές απαιτούνται για να αντισταθμίσουν τις ξαφνικές αλλαγές των εξωτερικών φορτίων, καθώς ο μεταβατικός χρόνος απόκρισης των μπαταριών ή των υπερπυκνωτών είναι συνήθως μικρότερος από 10 δευτερόλεπτα. Όταν οι συνθήκες εργασίας της στοιβάς κυψελών καυσίμου προσαρμόζονται στα εξωτερικά φορτία, οι μπαταρίες ή οι υπερπυκνωτές δεν παρέχουν πλέον ρεύμα στο δίκτυο [14].

**Κόστος.** Η εφαρμογή οποιασδήποτε νέας τεχνολογίας σε ένα πλοίο έχει ένα κόστος που συνδέεται με αυτήν, το οποίο μπορεί φυσικά να δράσει για να εμποδίσει τη μετάβαση σε νέα συστήματα ισχύος και πρόωσης. Ωστόσο, η εκτίμηση της πριμοδότησης της καινοτομίας ενός πλοίου με την εφαρμογή του τύπου της καθαρής παρούσας αξίας είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο που θα μπορούσε να βοηθήσει στην αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης για την απόκτηση και τις επιχειρησιακές αποφάσεις. Ξεκίνησε η ανάπτυξη κυψελών καυσίμου για ναυτιλιακές εφαρμογές πριν από μισό αιώνα, αλλά το υψηλό κόστος θεωρείται συνήθως ως ο πρωταρχικός παράγοντας που τους περιορίζει ευρεία χρήση. Το υψηλό κόστος προκύπτει από τις ακόλουθες πτυχές [14]:

- i. **Υψηλό κόστος στοιβάς.** Οι τιμές μονάδας των στοιβών κυψελών καυσίμου είναι περισσότερες από 50 \$/kW για το PEMFC και περίπου 4000–9000 \$/kW για τα MCFC και SOFC επί του παρόντος, οι οποίες είναι σημαντικά πιο ακριβές από τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής κινητήρων ντίζελ. Η επίτευξη μειωμένου κόστους στοιβάς εξαρτάται από τη χρήση φθηνότερων υλικών ηλεκτροδίων παρά από καταλύτες πολύτιμων μετάλλων. Επιπλέον, με την αύξηση του ετήσιου όγκου παραγωγής, οι τιμές μονάδας θα μειώνονται σταδιακά λόγω οικονομιών κλίμακας. Για παράδειγμα, το κόστος στοιβάς SOFC αναμένεται να μειωθεί σε ανταγωνιστική τιμή, 170 \$/kW, μέσω της μαζικής παραγωγής και της κλιμάκωσης των κυττάρων. Επιπλέον, η αυξημένη απόδοση του συστήματος με την κλιμάκωση κυψέλης θα μειώσει επίσης το λειτουργικό κόστος.
- ii. **Μικρότερη διάρκεια ζωής της στοιβάς.** Η μέγιστη διάρκεια ζωής στοιβάς των MCFC και SOFC είναι συνήθως περίπου 40.000 ώρες. Σε κάθε περίπτωση, η διάρκεια ζωής της στοιβάς είναι σημαντικά μικρότερη από τη διάρκεια ζωής 20-30 ετών των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας κινητήρων ντίζελ, γεγονός που αυξάνει περαιτέρω το κόστος επένδυσης της μονάδας. Η προ επεξεργασία καυσίμου, οι τεχνολογίες υλικών ηλεκτροδίων και οι σταθερές συνθήκες λειτουργίας είναι χρήσιμες για τον μετριασμό της υποβάθμισης της στοιβάς.
- iii. **Υψηλότερο κόστος βοηθητικών συστημάτων και εξαρτημάτων.** Οι μονάδες αποθήκευσης καυσίμου, οι μονάδες αναμόρφωσης, οι μονάδες WHR, τα συστήματα παρακολούθησης και τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι πιο ακριβά από αυτά για συμβατικούς κινητήρες ντίζελ. Ωστόσο, η μαζική παραγωγή θα μείωνε το κόστος των εξαρτημάτων και η αυξημένη ενεργειακή απόδοση που παρατηρείται με τα υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου θα εξοικονομούσε κάποιο λειτουργικό κόστος.
- iv. **Κόστος επένδυσης για χερσαίες υποδομές.** Επί του παρόντος, η υποδομή για την παραγωγή, μεταφορά, αποθήκευση και ανεφοδιασμό των ανανεώσιμων καυσίμων είναι ανεπαρκής και χωρίς ρυθμιστική παρέμβαση, η τεράστια επένδυση που απαιτείται θα εκδηλωθεί σε αυξημένες τιμές καυσίμων. Οι τιμές των ανανεώσιμων καυσίμων που

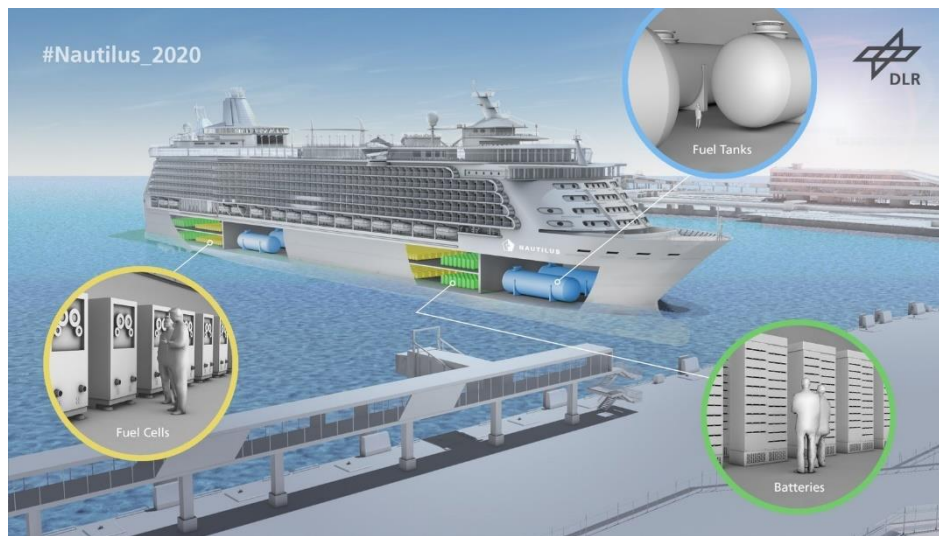
συζητούνται σε αυτό το έγγραφο είναι συνήθως υψηλότερες από τα συμβατικά καύσιμα πλοίων. Ωστόσο, με ολοένα και πιο αυστηρούς κανονισμούς για τις τοπικές εκπομπές σε περιοχές ελέγχου εκπομπών και κοντά σε λιμενικές περιοχές, υποδομές για φιλικές προς το περιβάλλον τα καύσιμα γίνονται σταδιακά απαραίτητα.

- v. **Λειτουργικό κόστος.** Κατά τη φάση λειτουργίας, η κατανάλωση καυσίμου είναι το κύριο κόστος. Άλλα λειτουργικά έξοδα περιλαμβάνουν το κόστος επισκευής και συντήρησης, το κόστος εκπαίδευσης και κατάρτισης για ειδικές επαγγελματικές δεξιότητες και υψηλότερους μισθούς για τα πληρώματα με υψηλότερα επίπεδα δεξιοτήτων. Το κόστος καυσίμων εξαρτάται από την κατανάλωση καυσίμου και την τιμή του καυσίμου. Το πρώτο σχετίζεται με την ενεργειακή απόδοση και το δεύτερο συνδέεται με επενδύσεις σε υποδομές καθώς και με την προσφορά και τη ζήτηση της αγοράς. Οι στοίβες κυψελών καυσίμου έχουν υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Εάν ένα GT ή τουρμπίνα ισχύος εγκαθίστανται για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας, η συνολική απόδοση του συστήματος θα αυξηθεί. Ωστόσο, βοηθητικά συστήματα και εξαρτήματα όπως η αναμόρφωση, η ψύξη, η ανακύκλωση και ο έλεγχος σχετίζονται με αντλίες, ανεμιστήρες/ανεμιστήρες, αισθητήρες και ελεγκτές (που συνήθως αναφέρονται ως ισοζύγιο εγκαταστάσεων, BoP), οι οποίοι θα καταναλώνουν παρασιτική ενέργεια. Έτσι, η καθαρή απόδοση του συστήματος θα μειωθεί σημαντικά. Επιπλέον, η καθαρή απόδοση του συστήματος μειώνεται περαιτέρω όταν η μονάδα λειτουργεί σε συνθήκες μερικού φορτίου. Συνολικά, η ενεργειακή απόδοση σχετίζεται με το σχεδιασμό του συστήματος, τις προκαθορισμένες στρατηγικές ελέγχου, την υποβάθμιση της στοίβας και τις συνθήκες λειτουργίας.

Οι αξιοπρόσεκτοι τομείς των οφελών των Κυψελών Καυσίμου στη ναυτιλία περιλαμβάνουν:

- **Μείωση Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου:** Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν χωρίς εκπομπές CO<sub>2</sub> και άλλων επιβλαβών αερίων. Αυτό συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τα πλοία, βελτιώνοντας την περιβαλλοντική απόδοση.
- **Αύξηση Αποδοτικότητας:** Οι κυψέλες καυσίμου είναι αποδοτικές στη μετατροπή καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια, προσφέροντας υψηλή απόδοση και αποτελεσματικότητα.
- **Μείωση Θορύβου και Δόνησης:** Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν σε σιωπηλή λειτουργία, μειώνοντας τον θόρυβο και τη δόνηση στα πλοία σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς εσωτερικούς καύσης κινητήρες.
- **Μεγαλύτερη Αυτονομία:** Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη αυτονομία στα πλοία σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες λιθίου.
- **Συνεχής Παροχή Ενέργειας:** Οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν συνεχή παροχή ενέργειας, επιτρέποντας μακρά αυτονομία και εξαιρετική αξιοπιστία στη λειτουργία των πλοίων.
- **Προώθηση Αειφορίας:** Η χρήση κυψελών καυσίμου ενθαρρύνει την ανάπτυξη βιώσιμων τεχνολογιών και πηγών ενέργειας, συμβάλλοντας στην προώθηση της αειφορίας στον τομέα της ναυτιλίας.
- **Μείωση Εξάρτησης από Ορυκτά Καύσιμα:** Η χρήση κυψελών καυσίμου μειώνει την εξάρτηση της ναυτιλίας από τα πετρελαϊκά καύσιμα.

Συνολικά, οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν πολλά οφέλη στη ναυτιλία, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών και στη βελτίωση της περιβαλλοντικής και οικονομικής απόδοσης των πλοίων.



*Εικόνα 3.11: Κυψέλες Καυσίμου στην Ναυτιλία*

### 3.5.3. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η αιολική και η ηλιακή ενέργεια ενδέχεται να έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μπορεί να είναι χρήσιμες για τη συμπλήρωση των υφιστάμενων συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Η πιθανή μείωση του CO<sub>2</sub> για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας επί του σκάφους αναφέρεται ότι είναι μεταξύ 0,2 και 12 τοις εκατό, ενώ τα υβριδικά συστήματα αιολικής-ηλιακής ενέργειας μπορούν να επιτύχουν έως και 40 τοις εκατό της εξοικονόμησης καυσίμου. Παρά τις δυνατότητές τους για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, δεν έχουν ακόμη τεθεί σε εφαρμογή. Θεωρούμενη ως βιώσιμη εναλλακτική λύση για την εμπορική ναυτιλία, είναι κοινή η άποψη ότι η στροφή από τα ορυκτά καύσιμα στα ανανεώσιμα καύσιμα απέχει ακόμη πολύ από το να επιτευχθεί [25].

Επί του παρόντος, εξετάζονται επιλογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) για τον παγκόσμιο ναυτιλιακό στόλο σε όλα τα επίπεδα και σε διάφορα μεγέθη, συμπεριλαμβανομένων: διεθνών και εγχώριων μεταφορών αγαθών, ανθρώπων και υπηρεσιών, ψάρεμα, τον τουρισμό και άλλες θαλάσσιες δραστηριότητες. Οι επιλογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλοία όλων των μεγεθών για την παροχή πρωτογενούς, υβριδικής ή/και βοηθητικής πρόωσης, καθώς και χρήση ενέργειας επί του σκάφους και στην ξηρά. Αυτές οι λύσεις καθαρής ενέργειας ενσωματώνονται μέσω μετασκευών στον υπάρχοντα στόλο ή ενσωματώνονται στη νέα ναυπηγική και σχεδιασμό, με τις περισσότερες εφαρμογές να χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως μέρος ενός ολοκληρωμένου πακέτου μέτρων απόδοσης. Η τρέχουσα εστίαση της εφαρμογής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη ναυτιλία είναι η χρήση της αιολικής ενέργειας με την χρήση διάφορων τύπων πανιών και η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας με χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ [14].

#### *Αιολική ενέργεια*

Η αιολική ενέργεια είναι ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με το κόστος της αιολικής ενέργειας να έχει πλέον ισοπεδωθεί συγκριτικά με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς όπως ο άνθρακας και το φυσικό αέριο. Οι πηγές αιολικής ενέργειας στην Ινδονησία είναι αρκετά μεγάλες, αλλά έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά από χώρες του υποτροπικού ημισφαιρίου των οποίων οι άνεμοι είναι μεγαλύτεροι από τις χώρες των τροπικών. Η αρχή λειτουργίας της αιολικής ενέργειας στην ξηρά και στη θάλασσα είναι σχεδόν η ίδια με τη χρήση μιας μεθόδου εργασίας που χρησιμοποιεί τη βασική δύναμη ανύψωσης ή έλξης. Η διαφορά είναι η τοποθεσία της εγκατάστασης. Wind Offshore η τοποθεσία εγκατάστασης είναι στη μέση της θάλασσας είτε σε πλωτή είτε σε σταθερή κατασκευή και ορισμένοι ταξινομούν την αιολική ενέργεια που είναι εγκατεστημένη στην παραλία καθώς και την αιολική υπεράκτια. Ο άνεμος μπορεί να οριστεί ως η ροή του αέρα πάνω από την επιφάνεια της γης. Δεδομένου ότι ο αέρας είναι ρευστό, η ροή αέρα και νερού (στον ωκεανό) ακολουθούν την ίδια αρχή. Η κλίση πίεσης στον αέρα (ή στη θάλασσα) οδηγεί σε ροή από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής πίεσης. Αυτές οι διακυμάνσεις της πίεσης προκαλούν κλίσεις πίεσης λόγω της ανομοιόμορφης θέρμανσης της γης και των ωκεανών στην επιφάνεια της γης, ειδικά της διαφοράς θερμότητας μεταξύ των τροπικών και των μεγάλων

γεωγραφικών πλάτη. Επομένως, ο άνεμος είναι μια έμμεση μορφή ηλιακής ενέργειας. Λόγω της περιστροφής της γης, αυτό το μοτίβο ανέμου μεγάλης κλίμακας θα επηρεαστεί από τη δύναμη Coriolis. Κοντά στην επιφάνεια της γης, στη γη ή στον ωκεανό, η τριβή επιβραδύνει τον άνεμο και η τραχύτητα της επιφάνειας (π.χ. τοπογραφία, δάση, κύματα) είναι η κύρια αιτία αυτών των δυνάμεων τριβής. Ως εκ τούτου, οι χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις του ανέμου ελέγχονται από την ηλιακή ακτινοβολία, το Coriolis (δηλαδή την περιστροφή της γης) και την επιφάνεια της γης (βουνά, κτίρια, θάλασσα κ.λπ.). Αυτές οι παραλλαγές μπορούν να μελετηθούν σε πολλαπλές κλίμακες: παγκόσμια μοτίβα ανέμου, περιφερειακά κλίματα, παραλλαγές εντός αιολικών πάρκων και γύρω από τα πτερύγια των στροβίλων. Μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη μείωση των εκπομπών και της εξοικονόμησης καυσίμων κατά διψήφιο αριθμό είναι η υποβοηθούμενη από τον άνεμο πρόωση πλοίου (WASP) ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για το μέλλον στη ναυτιλιακή βιομηχανία [25].

### **Αιολική Ενέργεια στην Ναυτιλία**

Πριν από την εμφάνιση της ατμομηχανής, τα πανιά μονοπωλούσαν την ανοιχτή θάλασσα, προωθώντας σχετικά μικρά πλοία με μεγάλα συμπληρώματα πληρώματος. Σε τελική ανάλυση, ο άνεμος είναι μια άμεσα διαθέσιμη, αν και κυμαινόμενη, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που είναι καλά κατανοητή. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι οι διακυμάνσεις της δύναμης του ανέμου και η δυσκολία αξιοποίησης του πλήρους δυναμικού πρόωσης κατά την πλεύση στον άνεμο ή κοντά στον άνεμο. Οι τρέχουσες πρωτοβουλίες περιλαμβάνουν την υιοθέτηση ενός αριθμού διαφορετικών τύπων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με στόχο μια σειρά τύπων πλοίων από πλοία μικρής κλίμακας χωριού έως μεγάλα μεταφορικά φορτία, τόσο ως κύρια όσο και ως βοηθητική πρόωση. Η αιολική πρόωση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις τεχνολογίες μαλακών πανιών, σταθερών πανιών, ρότορα, χαρταετού και τουρμπίνας [25].

Οι δύο κύριοι τρόποι εφαρμογής της αιολικής ενέργειας στη ναυτιλιακή βιομηχανία σήμερα είναι η υποβοηθούμενη από τον άνεμο πρόωση πλοίου (WASP) και η Παραγωγή Αιολικής Ενέργειας για χρήση ως ηλεκτρικού ρεύματος για τις ζητήσεις του πλοίου. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι πιο κατάλληλη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια στην ξηρά, επειδή η απώλεια ενέργειας και η μείωση της ταχύτητας του ανέμου που προκαλείται από την τριβή στη θάλασσα είναι μικρότερη από την ενδοχώρα [14].

Παρακάτω θα παρουσιαστούν διαφορετικές λύσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πλοίο είτε για τη σύλληψη αιολικής ενέργειας για την πρόωση είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπάρχουν δύο τύποι εξοπλισμού WASP που χρησιμοποιούνται για τη σύλληψη αιολικής ενέργειας για την πρόωση πλοίων, συγκεκριμένα πλοία αιολικής ενέργειας: παραδοσιακά και σύγχρονα. Παραδείγματα παραδοσιακών WASP είναι τα μαλακά πανιά ενώ τα σύγχρονα WASP είναι πανιά τύπου Wingsail, τύπου ρότορα Flettner και τα και τύπου αετού.

## Μαλακά Πανιά

Τα συμβατικά μαλακά πανιά που συνδέονται σε αυλές και ιστούς προσφέρουν μια δοκιμασμένη, ώριμη τεχνολογία ικανή να εκμεταλλευτεί άμεσα την προωθητική δύναμη του ανέμου. Αναφέρονται σε ένα είδος ιστοφορίας όπου τα ιστία κατασκευάζονται από ύφασμα, αλλά υποστηρίζονται από σκληρούς σκελετούς ή πλαίσια. Αυτό το σύστημα συνδυάζει τα οφέλη της παραδοσιακής ιστοφορίας με την ευελιξία των σκληρών σκελετών. Κάθε ιστός ή πανί συνδέεται σε έναν σκληρό σκελετό, ο οποίος στηρίζεται στην κατασκευή του πλοίου. Οι σκληροί σκελετοί μπορούν να είναι κατασκευασμένοι από διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων του αλουμινίου, του χάλυβα, ή ακόμη και του carbon fiber, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και τις απαιτήσεις του. Τα μαλακά πανιά με σκληρούς σκελετούς συνήθως χρησιμοποιούνται σε μοντέρνα ιστοφορικά πλοία και εκμεταλλεύονται τα οφέλη τους, όπως η ευελιξία και η ευκολία ρύθμισης των ιστίων, καθώς και η ισχυρή απόδοση όταν υπάρχει αρκετός άνεμος. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εμπορικά πλοία, και έχουν χρησιμοποιηθεί σε ορισμένες εφαρμογές για τη βελτίωση της απόδοσης και της βιωσιμότητας της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Αν και τα μαλακά πανιά με σκληρούς σκελετούς δεν είναι τόσο κοινά όσο άλλοι τύποι ιστοφορίας, όπως τα πανιά τύπου Flettner ή οι παραδοσιακοί σκελετοί από ατσάλι, έχουν δείξει ότι μπορούν να είναι αποτελεσματικά στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα εμπορικά πλοία. Επίσης, παρέχουν την ευελιξία να προσαρμόζονται στις διάφορες καιρικές συνθήκες, βελτιώνοντας την απόδοση και την οικονομία καυσίμων [14].

Τα μαλακά πανιά έχουν αρκετά πλεονεκτήματα πάρα την απλότητα του σχεδιασμού τους [25]:

- i. **Αποδοτικότητα:** Τα μαλακά πανιά με σκληρούς σκελετούς είναι σχεδιασμένα για να είναι αποδοτικά στην παραγωγή ισχύος από τον άνεμο. Με τη σωστή ρύθμιση, μπορούν να παρέχουν ισχυρή κίνηση στο πλοίο.
- ii. **Αυτοματισμός:** Οι σκληροί σκελετοί μπορούν να ρυθμιστούν αυτόματα για να προσαρμόζονται στις αλλαγές του ανέμου και τις καιρικές συνθήκες, βελτιώνοντας την απόδοση των ιστίων.
- iii. **Ευελιξία:** Οι σκληροί σκελετοί επιτρέπουν την εύκολη ρύθμιση και τον έλεγχο των ιστίων. Αυτό επιτρέπει στο πλοίο να προσαρμόζεται στις διάφορες καιρικές συνθήκες και την πορεία του.
- iv. **Μείωση Κατανάλωσης Καυσίμων:** Οι μαλακές πανιά με σκληρούς σκελετούς μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για καύσιμα σε εμπορικά πλοία, βοηθώντας στη μείωση του λεγόμενου "carbon footprint" της ναυτιλιακής βιομηχανίας.

Ωστόσο υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

- i. **Υψηλό Κόστος Εγκατάστασης:** Η εγκατάσταση των μαλακών πανιών με σκληρούς σκελετούς μπορεί να είναι ακριβή, καθώς απαιτεί την κατασκευή και την εγκατάσταση των σκελετών και την προσαρμογή τους στο συγκεκριμένο πλοίο.
- ii. **Συντήρηση:** Οι σκληροί σκελετοί απαιτούν τακτική συντήρηση και επιθεώρηση για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία τους και η αποτελεσματικότητα των ιστίων.

- iii. **Βάρος:** Οι σκληροί σκελετοί μπορεί να προσθέσουν σημαντικό βάρος στο πλοίο, το οποίο μπορεί να επηρεάσει την συνολική απόδοση και την σταθερότητα του.
- iv. **Αντίσταση Ανέμου:** Κατά την αντιμετώπιση υψηλών ανέμων, οι μαλακές επιφάνειες των ιστίων μπορεί να προκαλέσουν αντίσταση και να απαιτήσουν προσεκτική ρύθμιση.

Καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία εξελίσσεται και αναζητά βιώσιμες λύσεις, τα μαλακά πανιά με σκληρούς σκελετούς αναδύονται ως μια προοπτική για τη μείωση της εξάρτησης από τα καύσιμα και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των εμπορικών πλοίων.



*Εικόνα 3.12: Μαλακά Πανιά*

### DynaRig

Το DynaRig είναι ένα εξαιρετικά προηγμένο σύστημα ιστιοφορίας που συνδυάζει τα οφέλη των παραδοσιακών ιστίων με την προηγμένη τεχνολογία και την αυτοματοποίηση. Το DynaRig αναπτύχθηκε από τον Γερμανό ναυτικό αρχιτέκτονα Wilhelm Prolls και κατασκευάστηκε για πρώτη φορά στο επιβατηγό ιστιοφόρο Maltese Falcon, που κατασκευάστηκε το 2006. Το κύριο χαρακτηριστικό του συστήματος DynaRig είναι η χρήση πολλών τετράγωνων ιστίων που είναι τοποθετημένα σε ανεξάρτητες μαστές. Αυτές οι μαστές είναι συνήθως από ανθρώπινη εργασία και μπορούν να περιστρέφονται για να ρυθμιστούν αυτόματα σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες και τις ανάγκες του ταξιδιού. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα DynaRig να είναι εξαιρετικά αποδοτικό, καθώς τα ιστία πάντα ρυθμίζονται στην ιδανική γωνία για τον άνεμο [25].

Τα κύρια πλεονεκτήματα του DynaRig περιλαμβάνουν:

- i. **Υψηλή Απόδοση:** Το DynaRig είναι εξαιρετικά αποδοτικό στην παραγωγή ισχύος από τον άνεμο. Ο συνδυασμός πολλών μαστών και ιστίων εξασφαλίζει υψηλή ταχύτητα και απόδοση στην κίνηση του πλοίου.
- ii. **Αυτοματισμός:** Οι μαστοί του DynaRig μπορούν να ρυθμίζονται αυτόματα, προσαρμόζοντας τα ιστία στις αλλαγές του ανέμου και τις καιρικές συνθήκες. Αυτό βελτιώνει την απόδοση και μειώνει τον χρόνο που απαιτείται από το πλήρωμα για τη ρύθμιση των ιστίων.



- iii. **Ελάχιστη Ανθρώπινη Εργασία:** Η αυτοματοποίηση του DynaRig σημαίνει ότι χρειάζεται λιγότερη ανθρώπινη εργασία για τη λειτουργία των ιστίων, καθιστώντας το πιο εύκολο στην εκμετάλλευση.
- iv. **Αισθητική:** Το σύστημα DynaRig προσφέρει έναν εντυπωσιακό σχεδιασμό με τις πολλές μαστές και τα ιστία που αναπτύσσονται χωρίς την παραδοσιακή χρήση σχοινιών και κρίκων.
- v. **Βιωσιμότητα:** Εξαιτίας της αυξημένης απόδοσης και της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων, το DynaRig μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία.

Μερικά από τα μειονεκτήματα του συστήματος DynaRig περιλαμβάνουν:

- i. **Υψηλό Κόστος Εγκατάστασης:** Η εγκατάσταση ενός συστήματος DynaRig απαιτεί υψηλό κεφάλαιο, καθώς περιλαμβάνει την κατασκευή και τον εξοπλισμό πολλών μαστών και την εγκατάστασή τους στο πλοίο.
- ii. **Συντήρηση:** Οι μαστοί και τα ιστία του DynaRig απαιτούν τακτική συντήρηση και επιθεώρηση για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία τους. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται επιπλέον κόστη.
- iii. **Βάρος:** Οι πολλοί μαστοί και τα ιστία του DynaRig προσθέτουν σημαντικό βάρος στο πλοίο. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη συνολική απόδοση και την σταθερότητα του.
- iv. **Αντίσταση Ανέμου:** Κατά την αντιμετώπιση υψηλών ανέμων, οι μαστοί και τα ιστία του DynaRig μπορεί να προκαλέσουν αντίσταση και να απαιτήσουν προσεκτική ρύθμιση για να αντιμετωπιστούν αυτές οι συνθήκες.

Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, το DynaRig εξακολουθεί να αποτελεί ενδιαφέρουσα επιλογή για ορισμένα πλοία λόγω των υψηλών επιδόσεών του και της εντυπωσιακής εμφάνισής του. Η απόφαση για τη χρήση του πρέπει να λαμβάνεται υπόψη των συγκεκριμένων αναγκών και προϋπολογισμού του πλοιάρχου και του ιδιοκτήτη του πλοίου.



*Εικόνα 3.13: Πανιά Τύπου DynaRig*

## Wingsail

Τα πανιά τύπου wingsail (ή αλλιώς πανιά αετού) είναι ένας ειδικός τύπος ιστιοφόρων που χρησιμοποιείται σε πλοία για την παραγωγή ισχύος από τον άνεμο με στόχο την κίνηση του πλοίου. Αυτά τα πανιά έχουν μια στερεή δομή που μοιάζει με το φτερό ενός αεροσκάφους και αποκαλούνται "wingsails" λόγω της αεροδυναμικής τους ομοιότητας με τα φτερά. Η κύρια διακριτική ιδιότητα των πανιών τύπου wingsail είναι η στερεή δομή τους. Συνήθως κατασκευάζονται από ελαφρά υλικά όπως η ίνα άνθρακα και έχουν μια αεροτομή παρόμοια με αυτήν ενός φτερού αεροσκάφους. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει στα πανιά να διατηρούν μια σταθερή μορφή και να παράγουν ανύψωση, όπως το φτερό ενός αεροσκάφους. Τα πανιά τύπου wingsail σχεδιάζονται για υψηλή αεροδυναμική αποδοτικότητα. Βελτιστοποιούνται για την απορρόφηση και τη μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε μετακίνηση προς τα εμπρός με ελάχιστη αεροαντίσταση. Τα πανιά τύπου wingsail είναι εξοπλισμένα με συστήματα ελέγχου που τα επιτρέπουν να προσαρμόζονται και να ρυθμίζονται για να αξιοποιούν αποτελεσματικά τη δύναμη του ανέμου. Αυτά τα συστήματα ελέγχου μπορεί να είναι χειροκίνητα ή αυτοματοποιημένα και να λειτουργούν από το πλήρωμα ή από υπολογιστικά συστήματα [14].

Τα πανιά τύπου wingsail μπορούν σημαντικά να βελτιώσουν την απόδοση ενός πλοίου. Προσφέρουν υψηλότερες ταχύτητες, βελτιωμένη ικανότητα να ανέβουν αντί ανέμου και μείωση του κλίσματος (κλίσης) του πλοίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ταχύτερα και πιο άνετα ταξίδια. Ο βασικός στόχος των πανιών τύπου wingsail είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία. Χρησιμοποιώντας τη δύναμη του ανέμου ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας, τα πλοία μπορούν να επιτύχουν σημαντικές εξοικονομήσεις καυσίμων και χαμηλότερες λειτουργικές δαπάνες.

Τα πανιά τύπου wingsail έχουν αρκετά πλεονεκτήματα που τα καθιστά μια δελεαστική πρόταση. Το κύριο πλεονέκτημα των πανιών τύπου wingsail είναι η εξοικονόμηση καυσίμων. Χρησιμοποιώντας τη δύναμη του ανέμου για κίνηση, τα πλοία μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμων και, ως αποτέλεσμα, το κόστος λειτουργίας τους. Οι εξοικονομήσεις μπορούν να είναι σημαντικές, ιδίως σε μεγάλα εμπορικά πλοία. Επιπλέον, Η χρήση πανιών τύπου wingsail συνδέεται με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλιακής βιομηχανίας και την εναρμόνιση με παγκόσμιες προσπάθειες για την προστασία του περιβάλλοντος. Τα πανιά τύπου wingsail μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των πλοίων. Παρέχουν υψηλότερες ταχύτητες, βελτιωμένη ικανότητα να ανέβουν αντί ανέμου, και μείωση του κλίσματος του πλοίου (της κλίσης του πλοίου στο νερό), γεγονός που καθιστά τα ταξίδια πιο γρήγορα και άνετα. Η χρήση πανιών τύπου wingsail μειώνει την εξάρτηση των πλοίων από τα πετρελαϊκά καύσιμα και τις αυξανόμενες τιμές τους. Αυτό μπορεί να αυξήσει την ανεξαρτησία των πλοιοκτητών και να μειώσει τον κίνδυνο αυξανόμενων καυσίμων.

Παράλληλα με τα πλεονεκτήματα, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επιτυχής χρήση των πανιών τύπου wingsail απαιτεί καλή εκπαίδευση του πληρώματος, κατάλληλη συντήρηση και συμμόρφωση με τους ναυτιλιακούς κανονισμούς και πρότυπα ασφαλείας.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, τα πανιά τύπου wingsail έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα:

- i. **Εξάρτηση από τον Άνεμο:** Η κύρια εξάρτηση από τον άνεμο σημαίνει ότι η απόδοση των πανιών τύπου wingsail εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Σε περιοχές με ανεπαρκή ή ασταθή άνεμο, τα πανιά μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικά.
- ii. **Ανάγκη για Καλή Εκπαίδευση:** Η επιτυχής λειτουργία των πανιών τύπου wingsail απαιτεί καλή εκπαίδευση του πληρώματος. Το πλήρωμα πρέπει να κατανοεί τη λειτουργία και τη σωστή ρύθμιση των πανιών, καθώς και τις απαιτούμενες διαδικασίες ασφαλείας.
- iii. **Ανάγκη για Συντήρηση:** Όπως και όλα τα συστήματα πλοίου, τα πανιά τύπου wingsail απαιτούν τακτική συντήρηση. Οι ροπές και οι μηχανισμοί ελέγχου πρέπει να διατηρούνται σε καλή κατάσταση για να διασφαλίζεται η αποτελεσματική λειτουργία των πανιών.
- iv. **Κοστοβόρα Εγκατάσταση:** Η εγκατάσταση των πανιών τύπου wingsail σε ένα υπάρχον πλοίο μπορεί να είναι κοστοβόρα και απαιτεί μηχανικές αλλαγές στο πλοίο.
- v. **Κανονιστικές Απαιτήσεις:** Όπως και με άλλες ναυτιλιακές τεχνολογίες, τα πανιά τύπου wingsail πρέπει να συμμορφώνονται με διεθνείς κανονισμούς και πρότυπα ασφαλείας. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται επιπρόσθετο χρόνο και δαπάνη.
- vi. **Περιορισμένη Αποτελεσματικότητα σε Ορισμένες Συνθήκες:** Τα πανιά τύπου wingsail μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικά σε πλοία που λειτουργούν συνεχώς σε υψηλές ταχύτητες ή σε πλοία με περίπλοκες διαδρομές.



*Εικόνα 3.14: Πανιά Τύπου Wingsail*

## Περιστροφικό Πανί

Το περιστροφικό πανί Flettner είναι ένα κυλινδρικό πανί που περιστρέφεται και χρησιμοποιείται στη ναυτιλία για την πρόσληψη της ενέργειας του ανέμου για την κίνηση των πλοίων. Το περιστροφικό πανί Flettner λειτουργεί βάσει του αποτελέσματος Magnus, ένα φαινόμενο όπου ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο κινούμενο μέσα από ένα ρευστό παράγει ανύψωση και δύναμη στην κατεύθυνση της περιστροφής του. Ο τύπος αυτός του πανιού αποτελεί μια εξέλιξη των πανιών Flettner και χρησιμοποιείται συνήθως σε μεγάλα εμπορικά πλοία και πλοία που επιδιώκουν να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Το περιστροφικό πανί Flettner μπορεί να εγκατασταθεί στο κατάστρωμα του πλοίου και να περιστρέφεται, καταλαμβάνοντας τον ανεμοκίνητρο και παράγοντας ισχύ που ωθεί το πλοίο μπροστά. Όταν το πανί περιστρέφεται, το ανεμοκίνητρο δημιουργεί ανύψωση και δημιουργεί κίνηση προς την επιθυμητή κατεύθυνση.



*Εικόνα 3.15: Περιστροφικά Πανί Flettner*

Το περιστροφικό πανί Flettner προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα για τη ναυτιλία, καθιστώντας το μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία για τη μείωση της εξάρτησης από τα παραδοσιακά καύσιμα και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Ορισμένα από τα πλεονεκτήματά του περιλαμβάνουν:

- i. **Μείωση της Κατανάλωσης Καυσίμων:** Το περιστροφικό πανί Flettner μπορεί να λειτουργήσει ανεξάρτητα από τα παραδοσιακά κινητήρια συστήματα του πλοίου όταν οι κλιματολογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων κατά τη διάρκεια της πλοήγησης.
- ii. **Μείωση των Εκπομπών:** Η χρήση του περιστροφικού πανιού Flettner μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και άλλες περιβαλλοντικά επιβλαβείς εκπομπές από τα πλοία. Αυτό συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλιακής βιομηχανίας.
- iii. **Εξοικονόμηση Κόστους:** Οι μειώσεις στην κατανάλωση καυσίμων οδηγούν σε εξοικονόμηση κόστους για τους ναυλοκότες και τους εκμεταλλευτές πλοίων. Το περιστροφικό πανί Flettner μπορεί να αποδειχθεί οικονομικά αποδοτικό όταν χρησιμοποιείται με συνετό τρόπο.

- iv. **Απλή Εγκατάσταση και Συντήρηση:** Η εγκατάσταση του περιστροφικού πανιού Flettner είναι σχετικά απλή, και το σύστημα απαιτεί λίγη συντήρηση σε σύγκριση με άλλες προηγμένες τεχνολογίες.
- v. **Ευελιξία:** Το περιστροφικό πανί Flettner είναι ευέλικτο και μπορεί να εγκατασταθεί σε διάφορα είδη πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των εμπορικών και επιβατικών πλοίων.
- vi. **Συμμόρφωση με την Νομοθεσία:** Σε πολλές περιπτώσεις, η χρήση του περιστροφικού πανιού Flettner μπορεί να συμμορφώνεται με νομοθεσία που απαιτεί τη μείωση των εκπομπών από τα πλοία.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση του περιστροφικού πανιού Flettner εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες και δεν είναι πάντα αποτελεσματικό σε όλες τις καταστάσεις ανέμου. Ως εκ τούτου, η χρήση του συνήθως συμπληρώνει τα παραδοσιακά συστήματα κίνησης στα πλοία. Επιπλέον έχει και άλλα μειονεκτήματα όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- i. **Εξάρτηση από τον Άνεμο:** Η απόδοση του περιστροφικού πανιού Flettner εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ένταση και την κατεύθυνση του ανέμου. Σε περιπτώσεις απόλυτης αναγκαιότητας, όπως η ανάγκη για ταχεία αναχώρηση ή μετακίνηση κατά τη διάρκεια ακαταλληλότερων καιρικών συνθηκών, το περιστροφικό πανί ενδέχεται να μην είναι αρκετά αποτελεσματικό.
- ii. **Υψηλό Κόστος Εγκατάστασης:** Η εγκατάσταση του περιστροφικού πανιού Flettner μπορεί να συνεπάγεται υψηλό κόστος. Η προσθήκη αυτής της τεχνολογίας σε ένα υπάρχον πλοίο απαιτεί επενδύσεις σε εξοπλισμό και εργασίες εγκατάστασης.
- iii. **Συντήρηση:** Όπως και με άλλα συστήματα, το περιστροφικό πανί Flettner απαιτεί συντήρηση. Οι κυλινδρικοί και μηχανικοί μηχανισμοί πρέπει να ελέγχονται και να συντηρούνται τακτικά για να διατηρηθεί η απόδοση.
- iv. **Μη Ευελιξία σε Κατευθύνσεις:** Το περιστροφικό πανί Flettner είναι πιο αποτελεσματικό κατά την πλοήγηση προς την κατεύθυνση του ανέμου. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται κίνηση κατά την πλοήγηση προς τις πλευρικές ή αντίθετες κατευθύνσεις, η απόδοση μπορεί να είναι περιορισμένη.
- v. **Χώρος και Βάρος:** Η εγκατάσταση των περιστροφικών πανιών απαιτεί επιπλέον χώρο και βάρος στο πλοίο, που μπορεί να επηρεάσει τον σχεδιασμό και τη φόρτωση του πλοίου.

Ενώ το περιστροφικό πανί Flettner προσφέρει πολλά οφέλη, πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά οι συνθήκες και οι ανάγκες της κάθε ναυτιλιακής εφαρμογής πριν αποφασίσετε για την χρήση αυτής της τεχνολογίας.

## Πανιά Αετοί

Οι πανιά αετοί, γνωστά και ως συστήματα ιστιοφορίας με πανιά αετού, αποτελούν μια καινοτόμα τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε εμπορικά πλοία για τη βελτίωση της κίνησής τους και την αύξηση της αποδοτικότητας στη χρήση καυσίμων. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη μεγάλων πανιών αετού που αιχμαλωτίζουν τη δύναμη του ανέμου και παρέχουν μια επιπλέον πηγή θράσους. Τα πανιά αετοί λειτουργούν με βάση την αρχή της αεροδυναμικής ανύψωσης. Όταν το πανί αετού πετιέται σε υψηλά υψόμετρα, αιχμαλωτίζει τους ισχυρότερους και πιο σταθερούς ανέμους που βρίσκονται σε αυτά τα υψόμετρα. Η δύναμη του ανέμου στο πανί δημιουργεί μια δύναμη έλξης, η οποία μεταδίδεται στο πλοίο μέσω ενός σχοινιού. Αυτή η επιπλέον θράση μειώνει το φορτίο στους κύριους κινητήρες του πλοίου και μειώνει την κατανάλωση καυσίμων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πανιών αετού, συμπεριλαμβανομένων των σκληρών πανιών αετού, των μαλακών πανιών αετού και των πανιών αετού παραφούσκας (parafoil). Κάθε τύπος έχει το δικό του σχεδιασμό και χαρακτηριστικά, αλλά στοχεύουν όλοι στην αποτελεσματική αξιοποίηση της δύναμης του ανέμου [14].



*Εικόνα 3.16: Πανιά Αετοί*

Τα πανιά αετοί ενσωματώνονται συνήθως στα υφιστάμενα συστήματα κίνησης και ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου. Μπορούν να αναπτυχθούν και να αναιρεθούν όποτε απαιτείται, επιτρέποντας την ευελιξία στη χρήση τους. Πολλά συστήματα σχεδιάζονται για πλήρως αυτοματοποιημένη λειτουργία και μπορούν να ελεγχθούν απομακρυσμένα από τη γέφυρα του πλοίου. Το κύριο όφελος των πανιών αετού είναι η ικανότητά τους να μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων του πλοίου. Μέσω της αξιοποίησης της δύναμης του ανέμου, τα πλοία μπορούν να επιτύχουν εξοικονόμηση καυσίμων που μπορεί να φτάσει έως και 20% ή περισσότερο, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τον σχεδιασμό του συστήματος πανιών αετού. Αυτή η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων οδηγεί σε οικονομικές εξοικονομήσεις για τους ιδιοκτήτες και τους εκμεταλλευτές των πλοίων. Η αποτελεσματικότητα των πανιών αετού εξαρτάται από τις καιρικές και ανεμικές συνθήκες. Λειτουργούν καλύτερα όταν πλέουν με ευνοϊκούς ανέμους, αλλά η επίδρασή τους μπορεί να περιοριστεί σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες

ή όταν πλέουν κατά τον άνεμο. Όπως και με οποιαδήποτε νέα τεχνολογία, οι ιδιοκτήτες και οι εκμεταλλευτές πλοίων πρέπει να διενεργούν ανάλυση κόστους-οφέλους για να καθορίσουν την εφικτότητα και την οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης των συστημάτων πανιών αετού στο πλοίο τους. Παράγοντες όπως η διαδρομή του πλοίου, το λογιστικό προφίλ και οι τιμές των καυσίμων παίζουν ρόλο σε αυτήν την αξιολόγηση [14].

### Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες έχουν συζητηθεί εδώ και πολλά χρόνια για την πρόωση πλοίων. Ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν επιτυχημένα πρωτότυπα της εφαρμογής τους. Αυτό αντικατοπτρίζει συστημικά ζητήματα με την απόλυτη σταθερότητα και τους κραδασμούς τους και την εγγενή αναποτελεσματικότητα στη μετατροπή ενέργειας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Το πλεονέκτημα της τουρμπίνας είναι ότι μπορεί να συνεχίσει να αξιοποιεί την ισχύ ακόμη και όταν το σκάφος πλέει απευθείας στον άνεμο. Υπάρχει περίπτωση να γίνουν οι ανεμογεννήτριες ως παραγωγός βοηθητικής ενέργειας για πλοία και ως αντικατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά που παράγεται από μη ανανεώσιμες πηγές. Λαμβάνοντας υπόψη τις τεράστιες προόδους που έχουν γίνει στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν σημαντικά μαθήματα που θα μεταφερθούν τώρα στον τομέα της ναυτιλίας. Οι ανεμογεννήτριες για πλοία αντιπροσωπεύουν μια υποσχόμενη τεχνολογία για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Καθώς η προώθηση βιώσιμων πρακτικών στη ναυτιλία συνεχίζεται, αναμένεται η περαιτέρω ανάπτυξη και υιοθέτηση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών στον τομέα της ναυτιλίας [14].

## Ηλιακή Ενέργεια

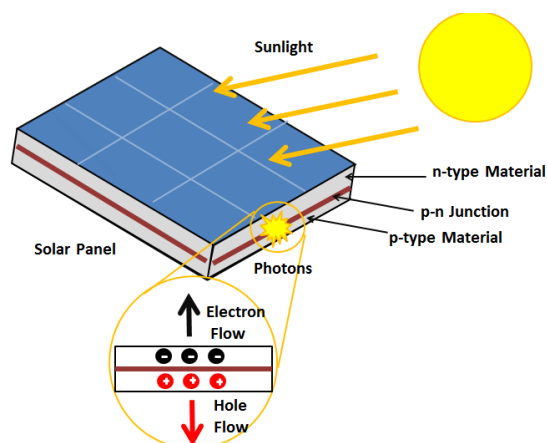
Το σύστημα μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίζεται σε παθητικές και ενεργητικές τεχνολογίες. Οι ενεργητικές τεχνολογίες χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά και μηχανικά συστήματα για τη συγκέντρωση, τη μετατροπή και τη διανομή της ηλιακής ενέργειας. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τα συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας και άλλα. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι η πιο κοινή ενεργητική τεχνολογία για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλίας. Οι παθητικές τεχνολογίες δεν χρησιμοποιούν κινητά μέρη ή ηλεκτρονικά συστήματα για να συγκεντρώσουν ή να κατευθύνουν την ηλιακή ακτινοβολία. Αντίθετα, βασίζονται σε φυσικά χαρακτηριστικά και υλικά που απορροφούν και αποθηκεύουν την ηλιακή ενέργεια, όπως οι ηλιακοί θερμαντές και οι παθητικοί ηλιακοί συλλέκτες. Οι παθητικές τεχνολογίες συνήθως χρησιμοποιούνται για θέρμανση και ψύξη κτιρίων. Οι ενεργητικές τεχνολογίες συνήθως απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και συστήματα ελέγχου για τη μέγιστη απόδοση, ενώ οι παθητικές τεχνολογίες είναι πιο απλές και ανθεκτικές. Και οι δύο κατηγορίες έχουν σημαντική εφαρμογή στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις συνθήκες της κάθε εφαρμογής. Σε αυτό το εδάφιο θα παρουσιαστεί μόνο η τεχνολογία φωτοβολταϊκών (PV) καθώς είναι καταλληλότερη για τέτοιες εφαρμογές [25].

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι συσκευές που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια από τον ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών κυψελών, που είναι κατασκευασμένες από ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο. Για να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά πάνελ απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, που περιλαμβάνει φωτόνια (μικρά ενεργειακά κβάντα) από τον ήλιο. Τα φωτόνια που απορροφώνται από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες μεταφέρουν ενέργεια στα ηλεκτρόνια των ημιαγωγικών υλικών που αποτελούν τις κυψέλες. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται "φωτοηλεκτρικό αποτέλεσμα". Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από την ενέργεια των φωτονίων κινούνται μέσα στην κυψέλη και δημιουργούν ρεύμα. Αυτό το ρεύμα συλλέγεται από τα ηλεκτρικά κυκλώματα του φωτοβολταϊκού πάνελ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ηλεκτρικές συσκευές ή να αποθηκευτεί σε μπαταρίες. Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα συνήθως είναι σε μορφή συνεχούς ρεύματος (DC), αλλά για πολλές εφαρμογές χρειάζεται εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Ένας αντιστροφέας (inverter) χρησιμοποιείται για να μετατρέψει το DC ρεύμα σε AC ρεύμα, πριν αυτό παραδοθεί στον κεντρικό ηλεκτρικό πίνακα του κτηρίου ή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [25].

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία είναι αποτέλεσμα συνδυασμού φωτοβολταϊκών στοιχείων για την αύξηση της ισχύος τους, είναι συσκευές υψηλής αξιοπιστίας, ανθεκτικότητας και χαμηλού θορύβου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το καύσιμο για το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι δωρεάν. Ο ήλιος είναι ο μόνος πόρος που απαιτείται για τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων και η ενέργειά του είναι σχεδόν ανεξάντλητη. Η τυπική απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών είναι περίπου 15%, που σημαίνει ότι μπορεί να μετατρέψει το 1/6 της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν παράγουν



θόρυβο, δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και δεν εκπέμπουν ρύπους στο περιβάλλον. Λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που καταναλώνονται στην παραγωγή φωτοβολταϊκών κυψελών, παράγουν αρκετές δεκάδες φορές λιγότερα διοξείδιο του άνθρακα ανά μονάδα σε σχέση με την ενέργεια που παράγεται από τεχνολογίες ορυκτών καυσίμων. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει διάρκεια ζωής πάνω από τριάντα χρόνια και είναι ένα από τα περισσότερα αξιόπιστα προϊόντα ημιαγωγών. Τα περισσότερα ηλιακά κύτταρα παράγονται από πυρίτιο, το οποίο είναι μη τοξικό και βρίσκεται σε αφθονία στο φλοιό της γης.



Εικόνα 3.17: Αρχές Λειτουργίας Φωτοβολταϊκού Πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (κυψέλη, μονάδα, δίκτυο) απαιτούν ελάχιστη συντήρηση. Στο τέλος του τον κύκλο ζωής, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν σχεδόν να ανακυκλωθούν πλήρως. Οι μονάδες Φωτοβολταϊκών φέρνουν ηλεκτρισμό σε αγροτικές περιοχές όπου δεν υπάρχει ηλεκτρικό δίκτυο και επομένως έχει αυξήσει την αξία ζωής αυτών των περιοχών. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα συνεχίσουν τη μελλοντική ανάπτυξη σε μια κατεύθυνση που θα γίνει κλειδί παράγοντας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα νοικοκυριά και τα κτίρια γενικότερα. Τα συστήματα εγκαθίστανται σε υπάρχουσες στέγες ή/και ενσωματώνονται στην πρόσοψη. Αυτά τα συστήματα συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια. Μια σειρά νομοθετικών πράξεων του Ευρωπαϊκή Ένωση στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της ενεργειακής απόδοσης αναπτύχθηκε, προωθώντας ιδιαίτερα τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία για την επίτευξη των στόχων της εξοικονόμησης ενέργειας και μείωση CO<sub>2</sub> σε δημόσια, ιδιωτικά και εμπορικά κτίρια. Επίσης, Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, συμβάλλει στα συστήματα ισχύος μέσω της διαφοροποίησης των πηγών ενέργειας και της ασφάλειας του εφοδιασμού με ηλεκτρική ενέργεια. Με την εισαγωγή κινήτρων για την ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές σε όλους ανεπτυγμένες χώρες, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν γίνει πολύ προσιτά και έγκαιρη επιστροφή των επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά συστήματα έχει γίνει σύντομη και συνεχώς μειώνεται.

Τα τελευταία χρόνια ο κλάδος αυτός αναπτύσσεται με ρυθμό 40% ετησίως και τα φωτοβολταϊκά η τεχνολογία δημιουργεί χιλιάδες θέσεις εργασίας σε τοπικό επίπεδο.

## Ηλιακή Ενέργεια στην Ναυτιλία

Όλες οι εξελίξεις σε αυτήν την ταχέως εξελισσόμενη τεχνολογία είναι διαθέσιμες για χρήση στις θαλάσσιες μεταφορές. Οι κύριοι περιορισμοί είναι η έλλειψη επαρκούς περιοχής ανάπτυξης για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και η απαιτούμενη αποθήκευση ενέργειας. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας προσφέρουν υψηλότερες δυνατότητες και καλύτερες προοπτικές για συστήματα πρόωσης με ηλιακή ενέργεια για πλοία βραχυπρόθεσμα, αλλά η πλήρης πρόωση πλοίων με χρήση ηλιακών φωτοβολταϊκών απαιτεί περαιτέρω τεχνική ανάπτυξη και είναι πιθανό να περιοριστεί σε σχετικά μικρά πλοία. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία αντιπροσωπεύει μια σημαντική τάση προς τη βελτίωση της βιωσιμότητας στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών. Η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ στα πλοία έχει αρχίσει να εφαρμόζεται όλο και περισσότερο, και τα οφέλη είναι πολλά. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για τον φωτισμό, τις ηλεκτρικές συσκευές και τα συστήματα πλοήγησης του πλοίου. Αυτό μειώνει την ανάγκη για λειτουργία γεννητριών που καταναλώνουν καύσιμα και επομένως μειώνει την κατανάλωση καυσίμων και το κόστος καυσίμων. Η χρήση ηλιακής ενέργειας μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων θερμοκηπίου που προκύπτουν από την καύση καυσίμων στις γεννήτριες. Αυτό συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος και τη συμμόρφωση με περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτιση των μπαταριών του πλοίου, επιτρέποντας την αποθήκευση ενέργειας για χρήση κατά τη διάρκεια νύχτας ή όταν οι συνθήκες του καιρού δεν είναι κατάλληλες για τη λειτουργία των γεννητριών. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ παρέχουν αυτόνομη ενέργεια για διάφορες λειτουργίες του πλοίου, όπως για τροφοδοσία ηλεκτρικών συσκευών, φωτισμό, ψύξη, και περισσότερα, μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές ενέργειας [14].

Η εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία απαιτεί εξειδικευμένο σχεδιασμό και την επιλογή κατάλληλων τεχνολογιών, αλλά αναμένεται να συνεχίσει να αναπτύσσεται για την αύξηση της βιωσιμότητας και τη μείωση της περιβαλλοντικής επίπτωσης της ναυτιλίας. Η ηλιακή ενέργεια αντιπροσωπεύει ένα φωτεινό μέλλον για τη ναυτιλία, καθώς οι τάσεις προς τη βιωσιμότητα και τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου συνεχίζουν να επικρατούν.

Παρά τα πολλά οφέλη, τα φωτοβολταϊκά πάνελ στη ναυτιλία έχουν και ορισμένα μειονεκτήματα και περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη [14]:

- **Μεταβλητή απόδοση:** Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ εξαρτάται από την ηλιοφάνεια και τον αέρα. Σε συνθήκες συννεφιάς ή κακοκαιρίας, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Αυτό μπορεί να απαιτήσει εφεδρικές πηγές ενέργειας για τη διασφάλιση της ενεργοποίησης.
- **Χώρος και εγκατάσταση:** Τα πάνελ απαιτούν επιφάνεια για την εγκατάστασή τους. Σε μεγάλα πλοία, αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα, αλλά σε μικρά πλοία μπορεί να είναι περιοριστικό.
- **Βάρος:** Τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν βάρος, και αυτό μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια και την απόδοση του πλοίου. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η κατάλληλη διανομή τους.

- **Συντήρηση:** Τα πάνελ απαιτούν σχετικά λίγη συντήρηση, αλλά όπως κάθε εξοπλισμός στη θάλασσα, χρειάζονται περιοδικό έλεγχο και συντήρηση.
- **Κίνδυνος βλάβης:** Κατά την εγκατάσταση και τη χρήση, τα πάνελ εκτίθενται σε διάφορους κινδύνους όπως πέτρες, θαλασσοταραχές και άλλες πιθανές βλάβες.
- 

Παρά τα παραπάνω, η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ στη ναυτιλία συνεχίζει να αυξάνεται λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της ηλιακής ενέργειας στον τομέα της βιωσιμότητας και της μείωσης του λειτουργικού κόστους. Η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, και αναμένεται να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στα πλοία του μέλλοντος.



*Εικόνα 3.18: Χρήση Φωτοβολταϊκών Πάνελ στην Ναυτιλία*

#### 4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ (Case study: Application on Tanker Vessel)

Για τον σκοπό της εργασίας θα μελετηθεί ένα Case Study στο οποίο θα γίνει η αξιολόγηση της εφαρμογής των τεχνολογιών που αναλύθηκαν στην Βιβλιογραφική Ανασκόπηση σε πλοία τύπου Tanker και θα εντοπιστεί ποιο είναι αντίκτυπο στο περιβάλλον και στην προσπάθεια που γίνεται για την απανθρακοποίηση του. Η ανάλυση αυτή θα γίνει με την χρήση πραγματικών δεδομένων που θα έχουν αντληθεί από μία Ναυτιλιακή εταιρεία που έχει στην κατοχή της πλοία τύπου Tanker. Επιπλέον, θα γίνει χρήση τεχνολογιών που υπάρχουν στην αγορά και των αντίστοιχων προδιαγραφών που δίνονται από τους κατασκευαστές τους. Στο τέλος θα γίνει σύγκριση των καταναλώσεων και των εκπομπών που έχει ένα πλοίο τέτοιου τύπου πριν και μετά την εγκατάσταση τέτοιων τεχνολογιών ώστε να εντοπιστεί εάν θα υπάρχει σημαντική βελτίωση.

Γενικές Πληροφορίες των Πλοίων:

| Όνομα      | Αριθμός IMO | Τύπος Πλοίου     | DWT [MT] | Σημαία         | Νηογνώμονας | Ναυπηγείο  | Χρονολογία Ναυπήγησης | Κύρια Μηχανή | Μήκος x Πλάτος   |
|------------|-------------|------------------|----------|----------------|-------------|--|-----------------------|--------------|------------------|
| INVICTUS   | 9536820     | Product Tanker   | 45953    | Marshal Island | DNV         | Shin Kurushima Dockyard Co.m, Japan                          | 2012                  | MAN 6S50ME-C | 181.5 m x 32.2 m |
| PROSPEROUS | 9412995     | Crude Oil Tanker | 121449   | Marshal Island | LR          | Sumitomo Heavy Industries Marine & Engineering CoLtd., Japan | 2009                  | MAN 6S60ME-C | 228.6 m x 42.0 m |

Πίνακας 4.1: Γενικές πληροφορίες πλοίων που θα χρησιμοποιηθούν στο Case Study

Το Invictus αποτελεί ένα Medium Range (MR) τάνκερ μεταφοράς προϊόντων πετρελαίου, ενώ το Celestial είναι ένα Suezmax ή αλλιώς Long Range 2 (LR2) τάνκερ μεταφοράς μαζούτ. Και για τα δύο πλοία κατά την διάρκεια της ναυπήγησης τους έχουν παρθεί μετρήσεις για τις καταναλώσεις και τις εκπομπές που έχουν ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας τους. Με βάση αυτές τις μετρήσεις θα υπολογιστούν στο επόμενο κεφάλαιο οι καταναλώσεις και οι εκπομπές πριν και μετά την θεωρητική εγκατάσταση των συστημάτων που θα περιγράψουν παρακάτω για ένα θεωρητικό σενάριο λειτουργίας.

Παρακάτω γίνεται περιγραφή όλων των συστημάτων που έχουν επιλεγεί ως λύσεις προκειμένου να μειωθούν οι καταναλώσεις και οι εκπομπές CO<sub>2</sub> των δύο πλοίων.

## 4.1.Εναλλακτικά Καύσιμα

Η κατασκευάστρια εταιρία MAN Energy Solution προσφέρει σαν λύσεις για δίχρονες κύριες μηχανές, όπως οι μηχανές των καραβιών που μελετάμε, την μετατροπή της μηχανής για χρήση διπλού καυσίμου. Η λύσεις αυτές βοηθάνε στην μείωση των εκπομπών της μηχανής καθώς επίσης προσφέρουν εξοικονόμηση καυσίμου και μείωση του λειτουργικού κόστους. Ουσιαστικά η MAN μετατρέπει τις συμβατικές μηχανές σε μηχανές διπλού καυσίμου που εκτός από συμβατικά καύσιμα μπορούν να κάψουν και LNG, LPG, αιθανόλη και μεθανόλη [26].



*Εικόνα 4.1: Πλοίο που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το LNG*

### 4.1.1. LNG ή Αιθανόλη

Η MAN μετατρέπει τις μηχανές τύπου ME-C σε τύπου ME-GI/GIE που επιτρέπουν την καύση LNG (ME-GI) ή αιθανόλη (ME-GIE), σε προσθήκη με τα συμβατά συμβατικά καύσιμα.

Ο κινητήρας λειτουργεί με τις ίδιες αρχές με τον συμβατικό κινητήρα ME-C. Διαθέτει το ίδιο προφίλ λειτουργίας και απόκριση φορτίου με το ME-C και έχει σχεδιαστεί για να προστατεύει από προβλήματα ολίσθησης και χτυπήματος αιθανίου.

Για την παροχή αποτελεσματικής έγχυσης αερίου, ένας κινητήρας ME-GI/GIE απαιτεί το LNG/αιθανόλη να εξατμιστεί και να τροφοδοτηθεί περίπου στα 300 bar. Εκτός από την εκ των υστέρων μετατροπή του κύριου κινητήρα, ένα σύστημα βαλβίδων αερίου (GVT) πρέπει να συμπεριληφθεί με ένα σύστημα παροχής αερίου καυσίμου (FGSS) που περιλαμβάνει το νέο ανεπτυγμένο σύστημα PVU της MAN Energy Solutions [26].

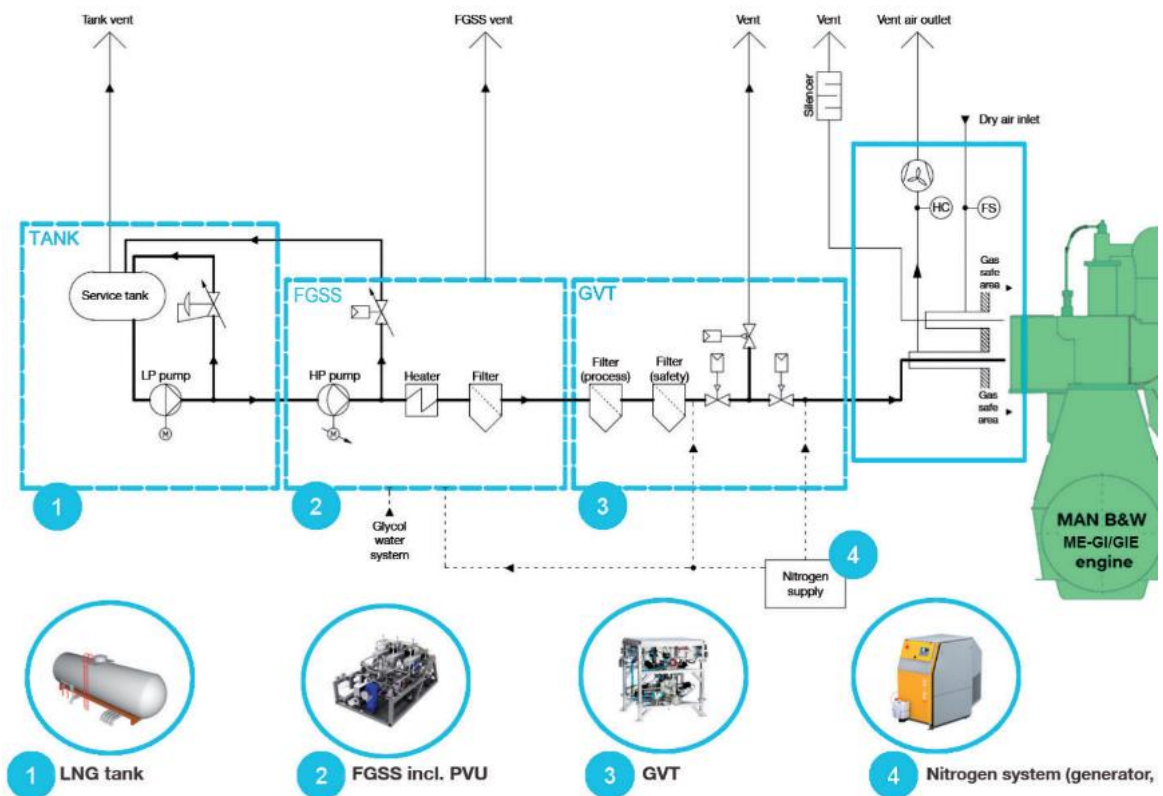
Η μετατροπή του κινητήρα περιλαμβάνει τα παρακάτω αντικείμενα:

- i. Καλύμματα κυλίνδρων με μπεκ αερίου
- ii. Μπλοκ ελέγχου αερίου
- iii. Σωλήνες αλυσίδας αερίου (υψηλής πίεσης σωλήνες διπλού τοιχώματος)
- iv. Σύστημα λαδιού στεγανοποίησης
- v. Πρόσθετο σύστημα ελέγχου ME-GI/GIE

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μετατροπή είναι τα παρακάτω:

- i. Καλή περιβαλλοντική απόδοση
- ii. Χαμηλότερα NO<sub>x</sub> και CO<sub>2</sub>
- iii. Αφαίρεση PM
- iv. Χωρίς SO<sub>x</sub>
- v. Θετική επίδραση στο EEDI
- vi. Εφαρμογή της αλυσίδας εφοδιασμού LNG σε μεγάλους κόμβους για το 2020

Όπως έχει αναφερθεί στην Βιβλιογραφικά ανασκόπηση η χρήση του LNG ως καύσιμο της Κύρια Μηχανής θα μπορούσε να μειώσει από 20-30% τις εκπομπές CO<sub>2</sub> καθώς το LNG έχει υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και κατά την καύση εκπέμπει μικρότερες ποσότητες CO<sub>2</sub>.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα συστήματος Dual Fuel της MAN Energy Solutions

#### 4.1.2. LPG ή Μεθανόλη

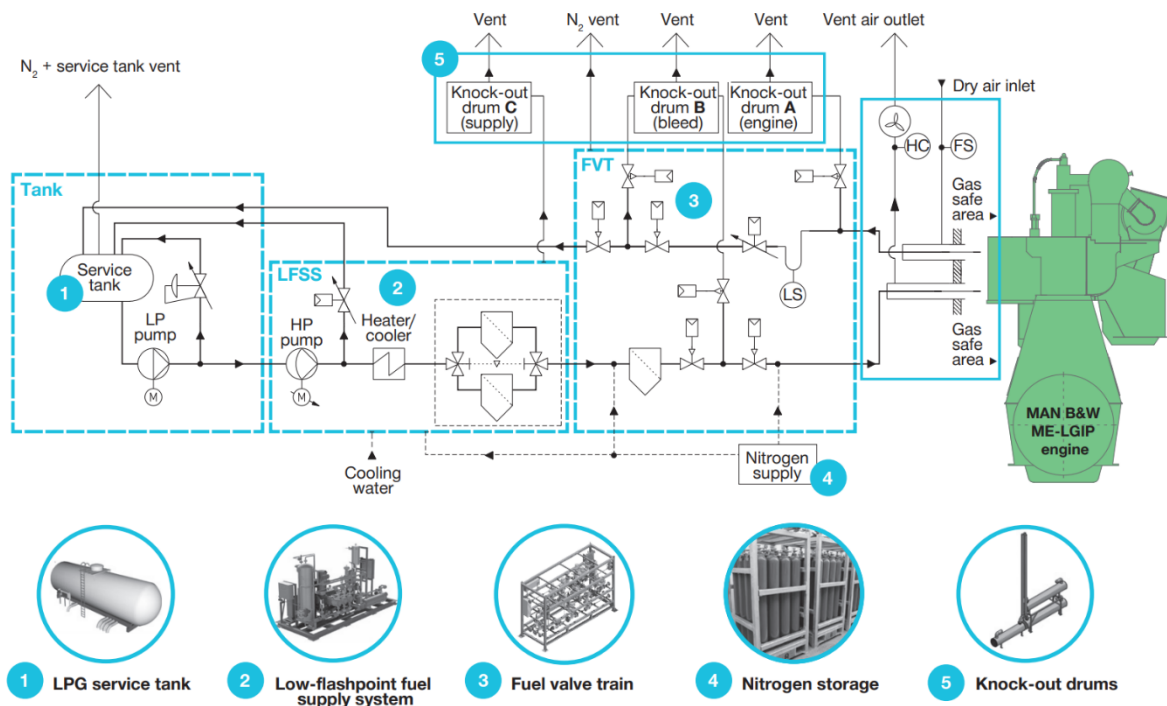
Οι κινητήρες ME-LGIP/LGIPM παρέχουν τον ηλεκτρονικό ψεκασμό, το προφίλ λειτουργίας και την απόκριση φορτίου όπως και στους συμβατικούς κινητήρες ME-C. Για να παρέχουν αποτελεσματική έγχυση αερίου, οι κινητήρες ME-LGIP/LGIPM χρησιμοποιούν βαλβίδες ενίσχυσης έγχυσης καυσίμου (FBIV) για να πιέσουν το υγρό υγραερίου/μεθανόλης έως και 500 bar, ακριβώς όπως ένας κινητήρας ME-C [26].

Η μετατροπή του κινητήρα περιλαμβάνει τα παρακάτω αντικείμενα:

- i. Καλύμματα κυλίνδρων με μπεκ αερίου (FBIV-P)
- ii. Μπλοκ ελέγχου αερίου
- iii. Σωλήνες αλυσίδας αερίου (σωλήνες διπλού τοιχώματος υψηλής πίεσης)
- iv. Σύστημα λαδιού στεγανοποίησης
- v. Πρόσθετο σύστημα ελέγχου ME-LGIP/LGIM

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η μετατροπή είναι τα παρακάτω:

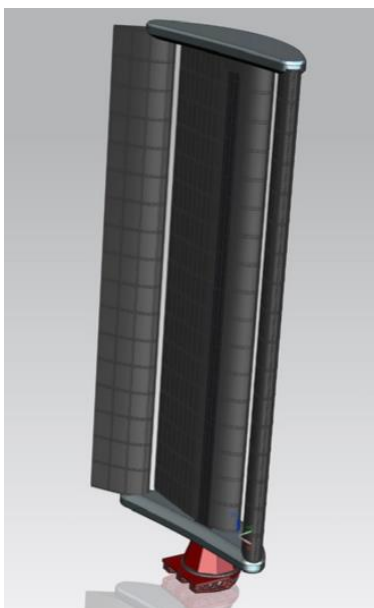
- i. Εξαιρετική περιβαλλοντική απόδοση, χαμηλότερα  $\text{NO}_x$  και  $\text{CO}_2$
- ii. Αφαίρεση PM
- iii. Θετική επίδραση στο EEDI
- iv. Χωρίς  $\text{SO}_x$  –
- v. Εφοδιαστική αλυσίδα σε εφαρμογή σε όλο τον κόσμο (600–700 μικρά πλοία μεταφοράς υγραερίου στην αγορά)
- vi. Γνωστές τιμές προϊόντων υγραερίου που διατίθενται παγκοσμίως



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα συστήματος Dual Fuel της MAN Energy Solutions

## 4.2. Αιολική Ενέργεια

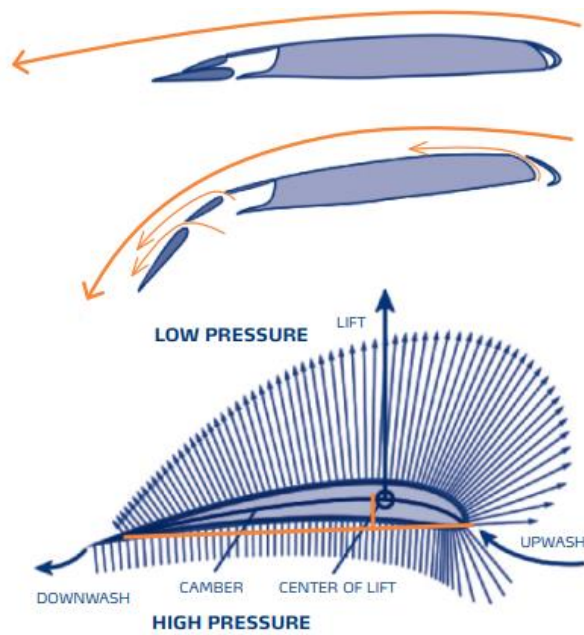
Ως λύση για την μείωση του CO<sub>2</sub> με χρήση της αιολικής ενέργειας θα επιλεγεί η εταιρεία Yara Marine Technologies. Η εταιρεία αυτή προσφέρει σαν λύση το προϊόν Bar-Tech WindWings το οποίο είναι ένα σύστημα που συνδυάζει πτερύγια πολλαπλών στοιχείων μαζί με μια προηγμένη λειτουργία βελτιστοποίησης της διαδρομής για την βέλτιστη αξιοποίηση της ισχύος του ανέμου. Το σύστημα αυτό δεν μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα για την πρόωση του πλοίου. Τα Bar-Tech WindWings προσφέρουν υποβοήθηση στο κύριο μέσο πρόωσης (Κύρια Μηχανή Εσωτερικής Καύσης) μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την κατανάλωση του [27].



*Εικόνα 4.2: Bar-Tech WindWings από την Yara Marine Technologies*

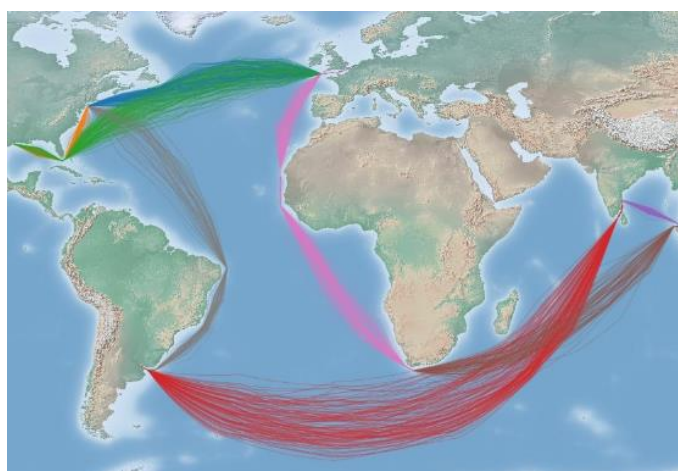
Τα WindWings προσφέρουν lift (ώση) χαμηλής πίεσης. Για οποιαδήποτε δεδομένη ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου, υπάρχει ένα κατάλληλο σημείο για το προφίλ και τη γωνία του φτερού. Τα ιστιοπλοϊκά σκάφη προσανατολίζουν τα πανιά τους με μια ευνοϊκή γωνία προσβολής μεταξύ του σημείου εισόδου του πανιού και του φαινομενικού ανέμου καθώς αλλάζει η πορεία τους. Τα WindWings αλλάζουν το προφίλ των πτερυγίων χρησιμοποιώντας flaps και περιστροφή για τη δημιουργία μιας βέλτιστης γωνίας με την οποία θα αξιοποιηθεί ο άνεμος στο μέγιστο δυνατό. Η ανύψωση σε ένα πανί, που λειτουργεί ως αεροτομή, συμβαίνει σε μια κατεύθυνση κάθετη στο προσπίπτον ρεύμα αέρα και προκαλεί την διαφορά πιέσεων μεταξύ των προσήνεμων και υπήνεμων επιφανειών, και εξαρτάται από την γωνία προσβολής, το σχήμα του πανιού, την πυκνότητα του αέρα και την ταχύτητα του φαινομενικού ανέμου. Τα πανιά επιτρέπουν την πρόοδο μιας ιστιοπλοΐας προς προσήνεμα, χάρη στην ικανότητά τους να δημιουργούν ώση. Η χαμηλή πίεση τραβάει το πλοίο προς τα εμπρός [27].





Σχήμα 4.3: Αρχή λειτουργίας του Πανιού

Σε συνεργασία με τα WingWings λειτουργεί και ένα σύστημα βελτιστοποίησης της διαδρομής προκειμένου να γίνει πλήρης εκμετάλλευση του ανέμου. Το σύστημα που χρησιμοποιείται είναι το ShipSEAT το οποίο εξετάζει το σύστημα ολιστικά και βελτιστοποιεί τις παραμέτρους διαδρομής και πλοίου ως μία. Το ShipSEAT (Ship System Efficiency Analysis Tool) είναι ένα μοναδικό ψηφιακό δίδυμο και εργαλείο βελτιστοποίησης το οποίο συνδυάζει την ακριβή προσομοίωση και αλληλεπίδραση μεταξύ της πλήρους υδροδυναμικής και πρόωσης του πλοίου, των συστημάτων με εξατομικευμένη βελτιστοποίηση, τους πολλαπλούς στόχους, της πρόβλεψης της απόδοσης και του λογισμικού δρομολόγησης. Το SSEAT ενσωματώνει ένα εσωτερικό εργαλείο δρομολόγησης καιρού το οποίο αξιολογεί και βελτιστοποιεί άμεσα διαδρομή βασισμένη σε διάφορες εισόδους και κριτήρια εξόδου [27].



Εικόνα 4.3: ShipSEAT

Το σύστημα της Yara Marine Technologies, Bar-Tech WindWings έχει σχεδιαστεί για να χαμηλώσει τα λειτουργικά κόστη του καραβιού προσφέροντας εύκολη λειτουργία και πολύ μικρή συντήρηση. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια από τα προσόντα του συστήματος [27]:

- Τα WindWings προσαρμόζονται στο κατάστρωμα του σκάφους, αλλά μπορούν να διπλωθούν με το πάτημα ενός κουμπιού.
- Το σύστημα είναι αυτοματοποιημένο, κάτι που σημαίνει ότι δεν απαιτείται επιπλέον πλήρωμα.
- Όλα τα εξαρτήματα είναι κατασκευασμένα από υψηλής ποιότητας, ανθεκτικά υλικά θαλάσσιας ποιότητας.
- Αποτελεσματικό, στιβαρό, αξιόπιστο και ασφαλές από το σχεδιασμό.
- Κατάλληλο τόσο για μετασκευές (Retrofits) όσο και για νέες κατασκευές (New Buildings).
- Δυνατότητα διαμόρφωσης για διαφορετικούς τύπους και μεγέθη πλοίων.

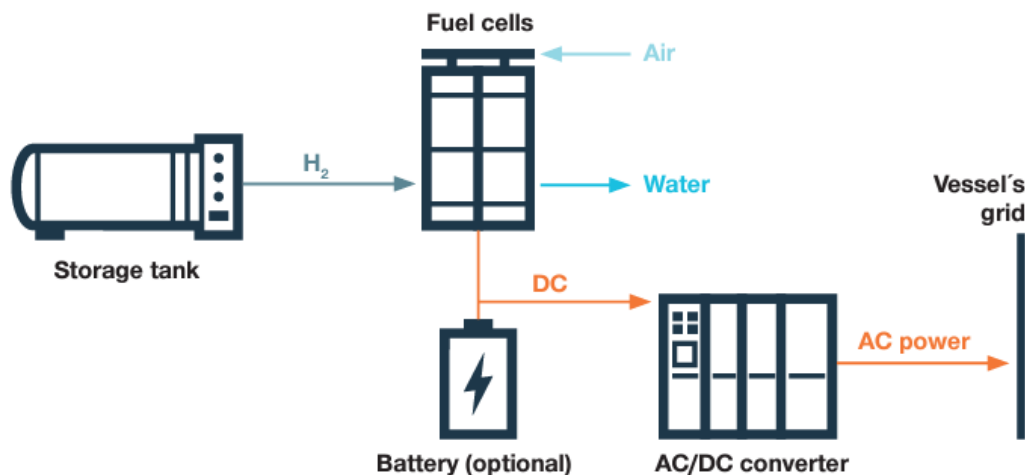
Ο συνδυασμός των συστημάτων Bar-Tech WindWings και ShipSEAT σύμφωνα με τον κατασκευαστή μπορούν να προσφέρουν μια μείωση 30% στην κατανάλωση του καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> που σχετίζονται την πρόωση του καραβιού. Αυτή η πληροφορία θα ληφθεί υπόψιν για τον υπολογισμό των εκπομπών του καραβιού εφόσον θεωρήσουμε ότι θα εξοπλιστεί με τα αναφερόμενα συστήματα [27].



*Εικόνα 4.4: Σύστημα Πανιών της Yara Marine Technologies*

### 4.3. Κυψέλες Καυσίμου

Η MAN Energy Solution έχει αναπτύξει μια λύση (LH2 Marine Power Pack) στην οποία μπορεί να εξοπλίσει ένα καράβι με ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση κυψελών καυσίμου. Με απλά λόγια, ένα πακέτο ισχύος υδρογόνου ξεκινά με το υδρογόνο ως καύσιμο που τροφοδοτείται από μια δεξαμενή αποθήκευσης. Ακολουθεί το σύστημα επεξεργασίας και τροφοδοσίας υδρογόνου και μετά οι μονάδες κυψελών καυσίμου που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Τέλος, τα ηλεκτρονικά ισχύος αναστρέφουν την ισχύ συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου σε εναλλασσόμενο ρεύμα που μπορεί να τροφοδοτηθεί στο κύριο δίκτυο του σκάφους όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Το LH2 Marine Power Pack πρέπει να συνοδεύεται από σύστημα παροχής αερίου καυσίμου, αποτελούμενο από τη δεξαμενή υγρού υδρογόνου και τα πλήρη ηλεκτρονικά ισχύος που αποτελούν επίσης μέρος της συσκευασίας [26].



Σχήμα 4.4: Διαδικασία μετατροπής υγρού Υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια

Ανάλογα με τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας του καραβιού, την μέγιστη διακύμανση φορτίου στο δίκτυο και ο τύπος των φορτίων που παρέχονται (ουσιώδη / μη ουσιώδη), υπάρχει η δυνατότητα να συνδεθεί παράλληλα με τις κυψέλες καυσίμου ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, αποτελούμενο από μπαταρίες προκειμένου να παρέχουν τη διαχείριση των ακραίων ζητήσεων ενέργειας και να επιτρέπουν στις κυψέλες καυσίμου να λειτουργούν στο βέλτιστο τους σημείο.

Το MAN LH2 Marine Power Pack είναι μια λύση που έχει σχεδιαστεί να βρίσκεται μέσα σε ένα εμπορευματοκιβώτιο με σκοπό την παραγωγή ενέργειας χωρίς εκπομπές για τη κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας του καραβιού. Το σύστημα έχει αναπτυχθεί για εύκολη εγκατάσταση στο πλοίο, με καθαρό περιβάλλον συναρμολόγησης και πρόσθετο φράγμα ασφαλείας. Είναι ένας αυτόνομος σχεδιασμός για εύκολη ενσωμάτωση σε μια υπάρχουσα διαμόρφωση σταθμού παραγωγής ενέργειας. Ο σχεδιασμός είναι επεκτάσιμος, καθώς μικρότερες μονάδες μπορούν να προέρχονται από ένα εμπορευματοκιβώτιο των 40 ποδιών [26].

Το βασικό στοιχείο του πακέτου ισχύος είναι το δοχείο κυψελών καυσίμου, κατασκευασμένο από τη MAN. Το εμπορευματοκιβώτιο είναι εξοπλισμένο με τις μονάδες κυψελών καυσίμου, το PLC ελέγχου του και όλο τον απαραίτητο βοηθητικό εξοπλισμό (τον λεγόμενο εξοπλισμό ισορροπίας εγκαταστάσεων) και τα χαρακτηριστικά ασφαλείας που απαιτούνται για τη λειτουργία του συστήματος. Στεγάζει επίσης όλες τις απαιτούμενες διασυνδέσεις τόσο με το σύστημα παροχής αερίου καυσίμου όσο και με τους μετατροπείς ισχύος.

Ένα εμπορευματοκιβώτιο 40 ποδιών είναι ικανό να παράγει 3,0 MWe ηλεκτρικής ενέργειας. Ίδια εμπορευματοκιβώτια μπορούν να συνδεθούν παράλληλα εάν απαιτείται υψηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Οι μπαταρίες μπορούν επίσης να ενσωματωθούν παράλληλα με το δοχείο κυψελών καυσίμου ανάλογα με την απαιτούμενη δυναμική απόκριση του συστήματος και την ικανότητα άμεσης αποδοχής φορτίου. Επιπλέον, μπορούν να εφαρμοστούν δυναμικές αντιστάσεις διακοπής για την υποστήριξη ασφαλούς τερματισμού λειτουργίας του τροφοδοτικού σε περίπτωση πλήρους φόρτισης της αποθήκης ενέργειας.

Δεδομένου ότι το LH2 Marine Power Pack δεν θα χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία φορτίων πρόωσης ή για την ανάκτηση συσκότισης του σκάφους, θεωρείται ως μη απαραίτητο σύστημα και συνήθως δεν υπάρχει ανάγκη για μπαταρίες, εάν το φορτίο δεν κυμαίνεται έξω από τις δυνατότητες ταχύτητας ράμπας των κυψελών καυσίμου και οι μεγαλύτεροι καταναλωτές είναι ενεργοποιημένοι VFD ελεγχόμενοι.

Ο σχετικός ηλεκτρικός εξοπλισμός αποτελείται από εξαρτήματα DC καθώς και AC και βρίσκεται σε ξεχωριστό ηλεκτρικό δωμάτιο. Οι μετατροπείς DC/DC χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση κυψελών καυσίμου, ενώ οι ενεργοί μετατροπείς Front End χρησιμοποιούνται για τους μετατροπείς προς τον κύριο πίνακα. Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι υδρόψυκτα με πλεονάζουσες αντλίες που περιλαμβάνονται στον εσωτερικό βρόχο. Ο μετασχηματιστής ανύψωσης είναι ξηρού τύπου με ψύξη με αέρα. Περιλαμβάνονται όλα τα απαραίτητα φίλτρα. Το πλήρες σύστημα έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει σε μια μικρότερη μονάδα εμπορευματοκιβωτίων με χαμηλότερη ισχύ εξόδου να προέρχεται από το βασικό σχεδιασμό.

Η κύρια φιλοσοφία ασφαλείας είναι ο μετριασμός τυχόν κινδύνων που θα μπορούσαν να αποτελέσουν απειλή για το πλήρωμα, το πλοίο ή το εμπορευματοκιβώτιο κυψελών καυσίμου (π.χ. διαρροή H<sub>2</sub>). Αυτοί οι κίνδυνοι μετριάζονται μέσω του μηχανικού σχεδιασμού του δοχείου και του σχεδιασμού της ισορροπίας των διεργασιών της μονάδας και μέσω του ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου που είναι εγκατεστημένο εντός του δοχείου.



Εικόνα 4.5: MAN LH<sub>2</sub> Marine Power Pack

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του συστήματος MAN LH<sub>2</sub> Marine Power Pack με ικανότητα παραγωγής 3.0 MWe [26]:

|   |   |
|---|---|
| <b>Κύριες Διαστάσεις (ΜήκοςxΠλάτοςxΎψος)</b>          | 12,800 x 3,100 x 3,200 mm   |
| <b>Βάρος</b>  | 39,400 kg   |
| <b>Παροχή H<sub>2</sub></b>                           | 2 x DN125/DN80 (εσωτ./εξωτ.), έως 79 g/s στο μέγιστο φορτίο, 3,5..6 bar(g)      |
| <b>Παροχή Νερού Ψύξης</b>                             | 2 x DN125(παροχή), 2 x DN125 (επιστροφή), θερμοκρασία παροχής νερού ψύξης 38 °C |
| <b>Σύστημα Κυψελών Καυσίμου</b>                       | Καθαρή Ισχύς Λειτουργίας: 55..200 kWe ανά μονάδα, Voltage: 350...720 VDC        |
| <b>Χαρακτηριστικά παροχής του Εμπορευματοκιβωτίου</b> | 1x 400 V (3ph), 1 x 230 V (1ph) από UPS, 1 x 24 VDC από UPS                     |

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά του LH<sub>2</sub> Marine Power Pack

Ένα LH<sub>2</sub> Marine Power Pack, το οποίο χρησιμοποιεί κυψέλες υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θεωρείται μια καθαρή και περιβαλλοντικά φιλική τεχνολογία. Όταν το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε μια κυψέλη υδρογόνου, αντιδρά με το οξυγόνο για να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, και το μόνο παραπροϊόν είναι το ατμός νερού (H<sub>2</sub>O). Αυτό σημαίνει ότι τα LH<sub>2</sub> Marine Power Pack δεν παράγει εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [26].

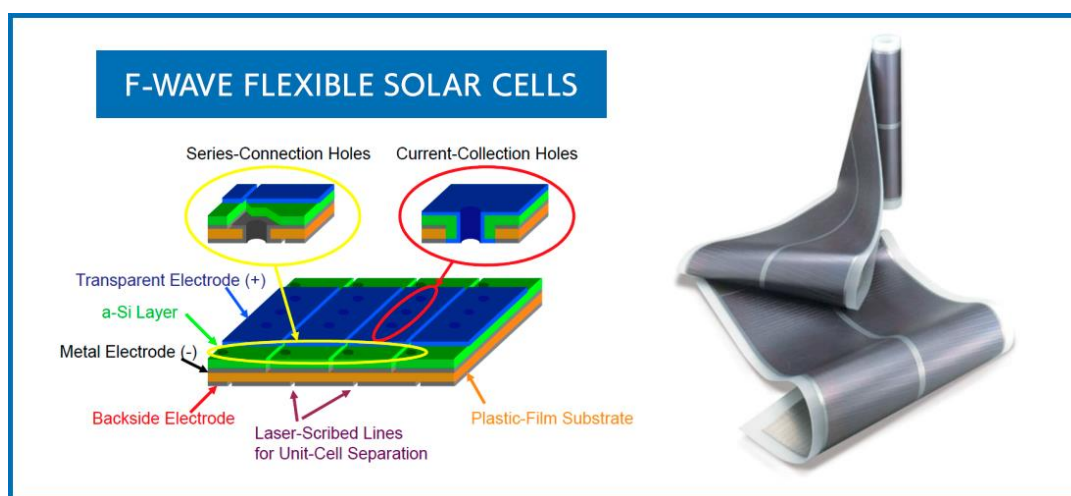
## 4.4. Ηλιακή Ενέργεια

Στο κύριο κατάστρωμα ενός караβιού τύπου Tanker υπάρχουν αρκετά μεγάλες επιφάνειες που θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν τοποθετώντας ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ. Τα ηλιακά πάνελ θα μπορούσαν να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα.

### Ηλιακά Πάνελ

Η εταιρεία Eco Marine Power έχει αναπτύξει ναυτιλιακά φωτοβολταϊκά (PV) πάνελ και κιτ πλαισίων τοποθέτησης που είναι σχεδιασμένα να αντέχουν στις δύσκολες συνθήκες στη θάλασσα και είναι κατάλληλα για όλα τα πλοία που κυμαίνονται από ακτοπλοϊκά έως θαλάσσια επιβατηγά πλοία και φορτηγά πλοία. Για χρήση σε πλοία, οι φωτοβολταϊκές μονάδες ή οι ηλιακοί συλλέκτες πρέπει να εγκατασταθούν σωστά χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα πλαίσια τοποθέτησης. Αυτά τα μακροχρόνια, υψηλής ποιότητας χαλύβδινα πλαίσια στήριξης κατασκευάζονται στην Ιαπωνία από την Teramoto Iron Works και είναι προσαρμοσμένα για να ταιριάζουν στον τύπο του πλοίου στο οποίο θα εγκατασταθούν [28].

Διατίθενται διάφοροι τύποι φωτοβολταϊκών μονάδων ναυτιλιακής ποιότητας και ο καθένας ταιριάζει σε πλαίσια στερέωσης Φ/Β. Αυτά τα κιτ έχουν σχεδιαστεί ειδικά από την Eco Marine Power για να αντέχουν στις δύσκολες συνθήκες στη θάλασσα και είναι το αποτέλεσμα της εμπειρίας που αποκτήθηκε κατά τη διάρκεια θαλάσσιων δοκιμών, αξιολόγησης στην ξηρά στο Onomichi MTTC και ανάλυσης CFD σε μια εικονική αεροδυναμική σήραγγα. Επιπλέον η Eco Marine Power προσφέρει ως λύση τα εύκαμπτα ηλιακά κύτταρα της F-WAVE που χρησιμοποιούν τη μοναδική δομή SCAF (Σειρά-Σύνδεση μέσω Ανοιγμάτων που σχηματίζονται σε Φιλμ) που επιτρέπει την ασύρματη σύνδεση με τα ηλεκτρόδια. Αυτή η διαδοχική κατασκευή επιτρέπει επίσης στα εύκαμπτα ηλιακά κύτταρα να απορροφούν ένα ευρύ ηλιακό φάσμα. Επιπλέον, τα κύτταρα επιδεικνύουν υψηλή απόδοση σε ζεστό καιρό λόγω εν μέρει του αποτελέσματος απόδοσης και η απόδοσή τους αυξάνεται σε σύγκριση με τη μείωση που συνήθως συμβαίνει με τα κρυσταλλικά κύτταρα [28].



Εικόνα 4.6: F-Wave εύκαμπτο ηλιακό κύτταρο

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά για τα ηλιακά πάνελ που προσφέρει η εταιρεία:

|                          |                     |                     |                     |                     |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Ισχύς</b>             | 23 W                | 47 W                | 47 W                | 72 W                |
| <b>Voltage Μπαταρίας</b> | 12/24V              | 12/24V              | 12/24V              | 12/24V              |
| <b>Μέγιστο Ρεύμα</b>     | 2/1 A               | 4/2 A               | 4/2 A               | 6/3 A               |
| <b>Μήκος</b>             | 600 mm              | 1109 mm             | 601 mm              | 855 mm              |
| <b>Πλάτος</b>            | 300 mm              | 292 mm              | 546 mm              | 546 mm              |
| <b>Επιφάνεια</b>         | 0.18 m <sup>2</sup> | 0.32 m <sup>2</sup> | 0.32 m <sup>2</sup> | 0.47 m <sup>2</sup> |
| <b>Πάχος</b>             | 15 mm               | 15 mm               | 15 mm               | 15 mm               |
| <b>Βάρος</b>             | 600 g               | 900 g               | 920 g               | 1200 g              |
| <b>Αριθμός Κυττάρων</b>  | 7                   | 15                  | 15                  | 23                  |

*Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών*

### **Ολοκληρωμένο Σύστημα εκμετάλλευσης Ηλιακής Ενέργειας**

Βασίζομενη στις παραπάνω τεχνολογίες ηλιακών πάνελ, η Eco Marine Power προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση ηλιακής ενέργειας θαλάσσης ή πλοίου. Αυτή είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα αποδεκτό από την κατηγορία που μπορεί να περιλαμβάνει έναν ναυτικό υπολογιστή, φορτιστές μπαταριών, μπαταρίες, ηλιακούς συλλέκτες ναυτιλίας και διεπαφές με άλλο εξοπλισμό και αισθητήρες. Κάθε λύση μπορεί να σχεδιαστεί και να κλιμακωθεί για να ταιριάζει σε μια μεγάλη ποικιλία πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των επιβατηγών πορθμείων, των κρουαζιερόπλοιων, των δεξαμενόπλοιων, των πλοίων μεταφοράς χύδην μεταλλεύματος, των πλοίων υποστήριξης ανοικτής θαλάσσης και επίσης των υπεράκτιων πλατφορμών, όπως οι εξέδρες άντλησης πετρελαίου και οι πλατφόρμες ανύψωσης.

Η ενέργεια που συλλέγεται από τις συστοιχίες θαλάσσιων ηλιακών πάνελ ή τη σειρά (ή στοιχειοσειρές) φωτοβολταϊκών (PV) πάνελ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία φορτίου συνεχούς ρεύματος, την παροχή εφεδρικής ή έκτακτης ισχύος ή τη σύνδεση σε φορτίο AC μέσω ενός μετατροπέα. Έτσι, κάθε πλοίο, σκάφος ή υπεράκτια πλατφόρμα μπορεί να αξιοποιήσει την καθαρή, χωρίς εκπομπές και ανανεώσιμη ενέργεια που παρέχει ο ήλιος. Τα συστήματά ενσωματώνουν στοιχεία εγκεκριμένα από την κατηγορία, όπως απαιτείται, συμπεριλαμβανομένων των εγκεκριμένων μπαταριών ClassNK [28].

## **Aquarius Marine Solar Power (MSP)**

Το Aquarius Marine Solar Power (MSP) είναι βασικά ένα αυτόνομο σύστημα ηλιακής ενέργειας πλοίου που δεν είναι συνδεδεμένο με άλλα συστήματα στο πλοίο, αλλά παρέχει έξοδο DC που μπορεί να συνδεθεί σε φορτίο DC ή μέσω μετατροπέα σε φορτίο AC [28] .

Τα κύρια συστατικά αυτής της λύσης περιλαμβάνουν:

- KEI-64S CPU/AGU - για μικρότερες λύσεις αυτό είναι προαιρετικό
- Έγχρωμη οθόνη αφής LCD 10,4 ιντσών - για μικρότερες λύσεις αυτό είναι προαιρετικό
- Ευέλικτα ηλιακά πάνελ ναυτιλιακής ποιότητας - διατίθεται γκάμα τύπων πάνελ.
- Κιτ πλαισίου τοποθέτησης ναυτικής ποιότητας, εάν απαιτείται.
- Ελεγκτές φόρτισης MPPT - διαθέσιμες επιλογές 60A και 80A.
- Μπαταρίες ή πακέτο μπαταριών

## **Aquarius MAS + Aquarius MSP**

Αυτό περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία της λύσης Aquarius Marine Solar Power (MSP) καθώς και πρόσθετο υλικό και διεπαφές για μετρητές ροής καυσίμου, GPS και άλλο εξοπλισμό σε ένα πλοίο. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα να παρακολουθεί την κατανάλωση καυσίμου, να υπολογίζει τις εκπομπές και μπορεί επίσης να παρακολουθεί τις κύριες στροφές του κινητήρα, την ισχύ της γεννήτριας και μια σειρά άλλου εξοπλισμού. Μπορεί επίσης να επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει λειτουργίες καταγραφής δεδομένων KEI 3240 και εξοπλισμό ενεργοποίησης/απενεργοποίησης [28].

Τα κύρια συστατικά αυτής της λύσης περιλαμβάνουν:

- KEI-64S CPU/AGU - πρόσθετη CPU, AGU ή συνδυασμένη CPU/AGU.
- Έγχρωμη οθόνη αφής LCD 10,4 ιντσών - διαθέσιμα μεγαλύτερα μεγέθη οθόνης.
- Ευέλικτα ηλιακά πάνελ ναυτιλιακής ποιότητας - διατίθεται γκάμα τύπων πάνελ.
- Κιτ πλαισίου τοποθέτησης ναυτικής ποιότητας, εάν απαιτείται.
- Ελεγκτές φόρτισης MPPT - διαθέσιμες επιλογές 60A και 80A.
- Μπαταρίες ή πακέτο μπαταριών
- Ενσωματωμένο Σύστημα Σύνδεσης - διεπαφές για διάφορες εισόδους και εξόδους.
- Λειτουργίες και υλικό παρακολούθησης απόδοσης πλοίου.
- Διανομέας Ethernet και μετατροπέας RS-232

Ένα πακέτο Aquarius Marine Solar Power ή Aquarius MAS + Solar είναι κατάλληλο για νεότευκτα έργα και μπορεί επίσης να τοποθετηθεί εκ των υστέρων σε υπάρχοντα πλοία (retrofit).



Πλεονεκτήματα και πλεονεκτήματα της Ship Solar από την Eco Marine Power [28]:

- Η ανανεώσιμη ενέργεια παρέχει μια πηγή ενέργειας χωρίς εκπομπές.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για φωτισμό έκτακτης ανάγκης ή άλλο εξοπλισμό. Αυτό μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη ισχύ από τα παραδοσιακά εφεδρικά συστήματα.
- Η χρήση ειδικών ελαφρών & εύκαμπτων ηλιακών συλλεκτών επιτρέπει την εγκατάσταση περισσότερων ηλιακών σε πλοία π.χ. σε τέντες, γωνιακές επιφάνειες, χώρους όπου απαιτείται πρόσβαση.
- Η λύση πληροί τις απαιτήσεις και τις οδηγίες του νηογνώμονα. Όταν συνδυάζεται με αποδοτικά θαλάσσια φώτα LED, η αποτελεσματική απόδοση του συστήματος μπορεί να αυξηθεί κατά 3 ή περισσότερο.
- Κατάλληλο για μετασκευή σε υπάρχοντα πλοία ή για ένταξη σε νέα ναυπηγικά έργα.
- Διαθέσιμα κιτ συστήματος για απλοποίηση της εγκατάστασης.
- Αξιοπίστη λύση.
- Χαμηλή συντήρηση.



*Εικόνα 4.7: Project στην Ναυτιλία με Ηλιακά Πάνελ*

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1. Καταναλώσεις και Εκπομπές CO<sub>2</sub> πριν τις μετατροπές

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα που έχουν μετρηθεί κατά την διάρκεια ναυπήγησης των δύο πλοίων από τους κατασκευαστές. Επιπλέον θεωρείται ένα συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας για να γίνει η μελέτη και η σύγκριση υπό ίσους όρους και να υπάρχει ένα σημείο αναφοράς.

#### 5.1.1. INVICTUS

Το πλοίο είναι εξοπλισμένο με την Κύρια Μηχανή MAN 6S50ME-C με μέγιστη δυνατή ισχύς (MCR) 9480 kW στα 127 RPM. Θα θεωρηθεί ότι το πλοίο θα ταξιδεύει στο 75% της μέγιστης ισχύος της κύριας μηχανής (MCR) καθώς συνήθως ένα καράβι δεν ξεπερνάει αυτό το ποσοστό. Επομένως γίνεται η παραδοχή ότι το καράβι καθ' όλη την διάρκεια του ταξιδιού του το φορτίο της κύριας μηχανής του είναι 75% του MCR.

|                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 75%         |
| <b>Ισχύς</b>                        | 7110 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 1212.3 kg/h |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 3826.0 kg/h |

*Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Κύριας Μηχανής*

Το καράβι διαθέτει 3 ηλεκτρογεννήτριες πετρελαίου Yanmar Co. Ltd. 6N21AL των 720 kW η κάθε μια. Σύμφωνα με την μελέτη που έχει γίνει κατά την Ναυπήγηση του πλοίου η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια ταξιδιού κατά μέσο όρο 360 kW και για να παραχθούν θα πρέπει να βρίσκεται σε λειτουργία μόνο μια ηλεκτρογεννήτρια στο 50% της μέγιστης ισχύς της. Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν προκύψει από τον κατασκευαστή, όταν μία ηλεκτρογεννήτρια αυτού του τύπου λειτουργεί στο 50% της μέγιστης ισχύς της τότε ισχύουν τα παρακάτω:

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 50%        |
| <b>Παραγωγή Ισχύς</b>               | 360 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 78.4 kg/h  |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 247.2 kg/h |

*Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά Ηλεκτρογεννήτριας*

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία εάν υπολογίσουμε σε διάστημα μιας ημέρας τις καταναλώσεις και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> του πλοίου προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

| Περιγραφή                           | Κύρια Μηχανή | Ηλεκτρογεννήτριες | Σύνολο ανά ώρα     | Σύνολο ανά ημέρα  |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 75%          | 50%               | -                  | -                 |
| <b>Ισχύς</b>                        | 7110 kW      | 360 kW            | -                  | -                 |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 1212.3 kg/h  | 78.4 kg/h         | <b>1290.7 kg/h</b> | <b>31.0 ton/d</b> |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 3826.0 kg/h  | 247.2 kg/h        | <b>4073.2 kg/h</b> | <b>97.8 ton/d</b> |

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα ανά ημέρα

### 5.1.2. PROSPEROUS

Το πλοίο είναι εξοπλισμένο με την Κύρια Μηχανή MAN 6S60ME-C με μέγιστη δυνατή ισχύς (MCR) 12350 kW στα 97 RPM. Θα θεωρηθεί όπως και παραπάνω ότι το πλοίο θα ταξιδεύει στο 75% της μέγιστης ισχύος της κύριας μηχανής (MCR) καθώς συνήθως ένα καράβι δεν ξεπερνάει αυτό το ποσοστό. Επομένως γίνεται η παραδοχή ότι το καράβι καθ' όλη την διάρκεια του ταξιδιού του το φορτίο της κύριας μηχανής του είναι 75% του MCR.

|                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 75%         |
| <b>Ισχύς</b>                        | 9248 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 1574.0 kg/h |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 4912.0 kg/h |

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά Κύριας Μηχανής

Το καράβι διαθέτει 3 ηλεκτρογεννήτριες πετρελαίου Daihatsu Diesel 6DK-20 των 800 kW η κάθε μια. Σύμφωνα με την μελέτη που έχει γίνει κατά την Ναυπήγηση του πλοίου η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά την διάρκεια ταξιδιού κατά μέσο όρο 600 kW και για να παραχθούν θα πρέπει να βρίσκεται σε λειτουργία μόνο μια ηλεκτρογεννήτρια στο 75% της μέγιστης ισχύς της. Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν προκύψει από τον κατασκευαστή, όταν μία ηλεκτρογεννήτρια αυτού του τύπου λειτουργεί στο 75% της μέγιστης ισχύς της τότε ισχύουν τα παρακάτω:

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 75%        |
| <b>Παραγωγή Ισχύς</b>               | 600 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 128.2 kg/h |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 404.2 kg/h |

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά Ηλεκτρογεννήτριας

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία εάν υπολογίσουμε σε διάστημα μιας ημέρας τις καταναλώσεις και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> του πλοίου προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6.

| Περιγραφή                           | Κύρια Μηχανή | Ηλεκτρογεννήτριες | Σύνολο ανά ώρα     | Σύνολο ανά ημέρα   |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 75%          | 75%               | -                  | -                  |
| <b>Ισχύς</b>                        | 9248 kW      | 600 kW            | -                  | -                  |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 1574.0 kg/h  | 128.2 kg/h        | <b>1702.2 kg/h</b> | <b>40.9 ton/d</b>  |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 4912.0 kg/h  | 404.2 kg/h        | <b>5316.2 kg/h</b> | <b>127.6 ton/d</b> |

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα ανά ημέρα

## 5.2. Καταναλώσεις και Εκπομπές CO<sub>2</sub> μετά τις μετατροπές

Στα πλαίσια της εργασίας θα θεωρηθούν δύο διαφορετικά σενάρια για τα δύο πλοία (Invictus και Prosperous). Επιπλέον το οικονομικός τομέας δεν θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία, κάνοντας την παραδοχή ότι ο πλοιοκτήτης έχει απεριόριστους οικονομικούς πόρους για την βελτίωση του πλοίου.

### 5.2.1. INVICTUS

Στο πρώτο σενάριο θα θεωρηθεί ότι στο πλοίο Invictus θα εγκατασταθούν τα παρακάτω συστήματα για την βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου και των συνολικών εκπομπών του.

1. Μετατροπή της Κύριας Μηχανής από τύπο ME-C σε τύπο ME-GI που επιτρέπουν την καύση LNG (ME-GI).
2. MAN LH2 Marine Power Pack για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις απαιτήσεις του πλοίου προκειμένου να μην λειτουργούν οι ηλεκτρογεννήτριες.

Το πλοίο είναι εξοπλισμένο με την Κύρια Μηχανή MAN 6S50ME-C με μέγιστη δυνατή ισχύς (MCR) 9480 kW στα 127 RPM. Η τροποποίηση που θα γίνει στην Κύρια Μηχανή από την MAN θα την μετατρέψει σε 6S50ME-GI και θα θεωρηθεί ότι η μέγιστη δυνατή ισχύς (MCR) θα παραμείνει ίδια στα 9480 kW στα 127 RPM. Η μείωση του CO<sub>2</sub> που μπορεί να επιτευχθεί (σύμφωνα με τον Κατασκευαστή MAN Energy Solutions) είναι από 20-30%. Γίνεται παραδοχή ότι μετά την μετατροπή θα επιτευχθεί μια μείωση της τάξης του 20% στις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Το 1 kg καυσίμου LNG μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγει 2.75 kg CO<sub>2</sub>, επομένως με βάση αυτήν την θεώρηση μπορεί να εκτιμηθεί και η κατανάλωση του LNG. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μετά την μετατροπή της Κύριας Μηχανής.

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Φορτίο</b>                               | 75%         |
| <b>Ισχύς</b>                                | 7110 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (LNG)</b>            | 1113.0 kg/h |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub> (20% Μείωση)</b> | 3060.8 kg/h |

Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά Κύριας Μηχανής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το πλοίο κατά την κατά την διάρκεια ταξιδιού κατά μέσο όρο έχει 360 kW κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλοίο θα εγκατασταθεί ένα εμπορευματοκιβώτιο LH<sub>2</sub> Marine Power Pack με ικανότητα παραγωγής 3000 kW<sub>e</sub>. Αυτό σημαίνει ότι υπερκαλύπτει την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που έχει το πλοίο. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6 η κατανάλωση σε υδρογόνο είναι 79 g/s στο μέγιστο φορτίο, οπότε εάν γίνει η παραδοχή ότι η κατανάλωση μειώνεται αναλογικά με βάση το φορτίο τότε για 360 kW φορτίο η κατανάλωση υδρογόνου θα είναι το 12% του 79 g/s άρα 9.5 g/s. Η μονάδα LH<sub>2</sub> Marine Power Pack καταναλώνει υδρογόνο και δεν παράγει καθόλου εκπομπές CO<sub>2</sub>. Από την στιγμή που θα εγκατασταθεί η μονάδα LH<sub>2</sub> Marine Power Pack στο πλοίο θα μπορεί να καλύπτει τις απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας που υπάρχουν κατά την διάρκεια του ταξιδιού 360 kW με αποτέλεσμα οι ηλεκτρογεννήτριες να μην χρειάζεται να λειτουργούν. Σύμφωνα με τα παραπάνω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στο καράβι.

| <b>Ηλεκτρογεννήτρια</b>                    |                     |
|--|---------------------|
| <b>Φορτίο</b>                              | 0%                  |
| <b>Παραγωγή Ισχύς</b>                      | 0 kW                |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b>        | 0 kg/h              |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>             | 0 kg/h              |
| <b>LH<sub>2</sub> Marine Power Pack</b>    |                     |
| <b>Φορτίο</b>                              | 12%                 |
| <b>Παραγωγή Ισχύς</b>                      | 360 kW              |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (H<sub>2</sub>)</b> | 9.5 g/s = 34.2 kg/h |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>             | 0 kg/h              |

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία εάν υπολογίσουμε σε διάστημα μιας ημέρας τις καταναλώσεις και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> του πλοίου προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

| Περιγραφή                                  | Κόρια Μηχανή | Ηλεκτρογεννήτριες | LH <sub>2</sub> Marine Power Pack | Σύνολο ανά ώρα     | Σύνολο ανά ημέρα   |
|--|--------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Φορτίο</b>                              | 75%          | 0%                | 12%                               | -                  | -                  |
| <b>Ισχύς</b>                               | 7110 kW      | 0 kW              | 360 kW                            | -                  | -                  |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b>        | 0 kg/h       | 0 kg/h            | 0 kg/h                            | <b>0 kg/h</b>      | <b>0 ton/d</b>     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (LNG)</b>           | 1113.0 kg/h  | 0 kg/h            | 0 kg/h                            | <b>1113.0 kg/h</b> | <b>26.71 ton/d</b> |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (H<sub>2</sub>)</b> | 0 kg/h       | 0 kg/h            | 34.2 kg/h                         | <b>34.2 kg/h</b>   | <b>820.8 kg/d</b>  |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>             | 3060.8 kg/h  | 0 kg/h            | 0 kg/h                            | <b>3060.8 kg/h</b> | <b>73.46 ton/d</b> |

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα ανά ημέρα

| Περιγραφή                             | Πριν την Μετατροπή | Μετά την Μετατροπή | Μείωση     |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------|------------|
| Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)          | 31.0 ton/d         | 0 ton/d            | -          |
| Κατανάλωση Καυσίμου (LNG)             | 0 ton/d            | 26.71 ton/d        | -          |
| Κατανάλωση Καυσίμου (H <sub>2</sub> ) | 0 kg/d             | 820.8 kg/d         | -          |
| Εκπομπές CO <sub>2</sub>              | 97.8 ton/d         | 73.46 ton/d        | <b>25%</b> |

Πίνακας 5.10: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.

Γίνεται αντιληπτό ότι ενώ οι ηλεκτρογεννήτριες δεν λειτουργούν μετά τις μετατροπές, η μείωση των CO<sub>2</sub> είναι μόνο 25%. Αυτό δείχνει ότι την μεγαλύτερη επίδραση στις εκπομπές και στις καταναλώσεις έχει η Κύρια Μηχανή του πλοίου που χρησιμοποιείται για την πρόωση του.

### 5.2.2. PROSPEROUS

Στο δεύτερο σενάριο θα θεωρήσουμε ότι στο πλοίο Prosperous θα εγκατασταθούν τα παρακάτω συστήματα για την βελτίωση της κατανάλωσης καυσίμου και των συνολικών εκπομπών του.

1. Τα πανιά WindWings της εταιρείας Yara Marine ως υποβοήθηση στην κύρια πρόωση
2. Εγκατάσταση Ηλιακών Πάνελ της εταιρείας Eco Marine Power για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για να καλύψει τις απαιτήσεις του πλοίου προκειμένου να μην λειτουργούν οι ηλεκτρογεννήτριες.

Στο πλοίο θα εγκατασταθεί το σύστημα WindWings της Yara Marine Technologies ως υποβοήθηση της κύριας πρόωσης. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή το σύστημα αυτό προσφέρει μείωση 30% στην κατανάλωση καυσίμου και των εκπομπών που σχετίζονται με την πρόωση του караβιού. Επομένως η μετά την εγκατάσταση η κύρια μηχανή θα έχει τα παρακάτω δεδομένα. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή για μείωση 30% της κατανάλωσης αντιστοιχεί σε φορτίο ίσο με 50 της μέγιστης δυνατής ισχύς που έχει η κύρια μηχανή (MCR).

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Φορτίο</b>                                    | 50%         |
| <b>Ισχύς</b>                                     | 6400 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel) (Μείωση 30%)</b> | 1101.8 kg/h |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub> (Μείωση 30%)</b>      | 3438.4 kg/h |

Πίνακας 5.11: Χαρακτηριστικά Κύριας Μηχανής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το πλοίο κατά την κατά την διάρκεια ταξιδιού κατά μέσο όρο έχει 360 kW κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλιακά πάνελ που θα εγκατασταθούν λαμβάνονται από τον Πίνακα 7 εκείνα με ικανότητα παραγωγής 72 W ηλεκτρικής ενέργειας το ένα με εμβαδόν 0.47 m<sup>2</sup>. Σύμφωνα με τις διαστάσεις του πλοίου, Μήκος 228,6 m και Πλάτος 42 m, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι συνολικές επιφάνειες είναι κάπου στο 70% του γινομένου των δύο διαστάσεων, επομένως κάπου στα 6700 m<sup>2</sup>. Μπορούμε να θεωρήσουμε επίσης ότι τα ηλιακά πάνελ μπορούν να εγκατασταθούν στο 60% των συνολικών επιφανειών, δηλαδή στα 4020 m<sup>2</sup>. Στην επιφάνεια αυτήν χωρούν 8553 τέτοια ηλιακά πάνελ με εμβαδόν 0.47 m<sup>2</sup> το κάθε ένα. Τα

8553 θα παράγουν περίπου ηλεκτρική ισχύς 615 kW. Αυτό σημαίνει ότι τις ώρες που υπάρχει ήλιος η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται μπορεί να καλύπτεται από την εκμετάλλευση του ηλίου. Μη έχοντας μεγάλο περίσσευμα, σημαίνει ότι τις ώρες που δεν θα υπάρχει ήλιος θα πρέπει να λειτουργούν οι ηλεκτρογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν θεωρηθεί ότι κάθε μέρα ο εκμεταλλεύσιμος ήλιος υπάρχει μέσο όρο κάπου στις 8 ώρες τότε υπολογίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα.

| <b>Ηλεκτρογεννήτρια</b>             |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 75%        |
| <b>Παραγωγή Ισχύς</b>               | 600 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 128.2 kg/h |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 404.2 kg/h |
| <b>Ηλιακά Πάνελ</b>                 |            |
| <b>Φορτίο</b>                       | 98%        |
| <b>Παραγωγή Ισχύς</b>               | 600 kW     |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου</b>          | 0 kg/h     |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 0 kg/h     |

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία εάν υπολογίσουμε σε διάστημα μιας ημέρας τις καταναλώσεις και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> του πλοίου προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

| Περιγραφή                           | Κύρια Μηχανή | Ηλεκτρογεννήτριες      | Ηλιακά Πάνελ | Σύνολο ανά ημέρα  |
|-------------------------------------|--------------|------------------------|--------------|-------------------|
| <b>Φορτίο</b>                       | 50%          | 75%                    | 98%          | -                 |
| <b>Ισχύς</b>                        | 6400 kW      | 600 kW                 | 600 kW       | -                 |
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 1101.8 kg/h  | 128.2 kg/h (x 16 ώρες) | 0 kg/h       | <b>28.5 ton/d</b> |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 3438.4 kg/h  | 404.2 kg/h (x 16 ώρες) | 0 kg/h       | <b>89.0 ton/d</b> |

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα ανά ημέρα

| Περιγραφή                           | Πριν την Μετατροπή | Μετά την Μετατροπή | Μείωση     |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------|------------|
| <b>Κατανάλωση Καυσίμου (Diesel)</b> | 40.9 ton/d         | 28.5 ton/d         | <b>30%</b> |
| <b>Εκπομπές CO<sub>2</sub></b>      | 127.6 ton/d        | 89.0 ton/d         | <b>30%</b> |

Πίνακας 5.14: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.

Στην παρούσες μετατροπές που μειώθηκε περισσότερο η κατανάλωση και οι εκπομπές της Κύριας Μηχανής σε σχέση με το Invictus, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει μεγαλύτερη μείωση στα δύο αυτά μεγέθη. Αντίστοιχα όμως η μείωση είναι αρκετά μικρή συγκριτικά με τα συστήματα που εγκαταστάθηκαν στο πλοίο.

### 5.3. Συμπεράσματα

Έχοντας ολοκληρώσει τις μετατροπές στα δύο πλοία Invictus και Prosperous, γίνεται αντιληπτό ότι η μείωση των καταναλώσεων και των εκπομπών CO<sub>2</sub> φαίνονται αρκετά μικρές συγκριτικά με το μέγεθος των συστημάτων που εγκαταστάθηκαν. Εάν γινόταν οικονομική μελέτη θα προέκυπτε ότι θα έπρεπε να επενδυθούν αρκετά χρήματα για την εγκατάσταση των συστημάτων αυτών, που θα ήταν ένα μεγάλο ποσοστό της αξίας των δύο πλοίων. Αυτό δείχνει ότι η βελτίωση υπαρχόντων πλοίων δεν είναι καθόλου εύκολη ακόμα, παρά την μεγάλη ποικιλία λύσεων που υπάρχουν στην αγορά. Επιπλέον θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι σε κάποιες περιπτώσεις όπως η κατανάλωση Υδρογόνου στο πρώτο σενάριο θα πρέπει να συνοδεύεται και από μελέτη σκοπιμότητας εξασφαλίζοντας ότι το πλοίο θα μπορεί να προμηθευτεί Υδρογόνο στα λιμάνια που προβλέπεται να ταξιδέψει καθ' όλη την διάρκεια της ζωής του.

Για την παρούσα εργασία επιλέχθηκαν τυχαία κάποιες από τις διαθέσιμες τεχνολογικές λύσεις που υπάρχουν στην αγορά, ίσως με άλλη επιλογή τα αποτελέσματα να ήταν πολύ πιο ενθαρρυντικά. Αυτό δείχνει ότι πριν γίνει μια εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να γίνει μελέτη σκοπιμότητας, και εκτίμηση της δαπάνης κεφαλαίου CAPEX και των λειτουργικών εξόδων OPEX για όλες τις δυνατές επιλογές που ο πλοιοκτήτης θεωρεί ότι μπορούν να αποδώσουν.

Επιπλέον προκειμένου να εγκατασταθούν όλα αυτά τα συστήματα σε ένα πλοίο εκτός από το περιβαλλοντικό όφελος που θα υπάρξει, ο πλοιοκτήτης θα πρέπει να αναλογιστεί πιο θα είναι το δικό του όφελος. Για παράδειγμα εάν θα υπάρξουν καλύτερα ναύλα, από μεγαλύτερους Ναυλωτές και σε βάθος χρόνου θα υπάρξει απόσβεση στην επένδυση που θα γίνει ή θα βελτιώσει την εικόνα και το κύρος του πλοιοκτήτη στον χώρο της Ναυτιλίας, κάτι που επιδιώκεται από πολλούς. Στην περίπτωση που ο πλοιοκτήτης δεν επωφεληθεί σε κάποιον τομέα είναι δύσκολο να επενδύσει σε μια τέτοια ενέργεια.



## 6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Είναι σαφές ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις και ευκαιρίες στον αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η απανθρακοποίηση της ναυτιλίας απαιτεί συλλογική προσπάθεια και συνεργασία σε διεθνές επίπεδο. Οι πράσινες τεχνολογίες και οι καινοτόμες λύσεις προσφέρουν έναν δρόμο προς μια πιο βιώσιμη ναυτιλιακή βιομηχανία. Η χρήση καθαρών καυσίμων, όπως το υγρό υδρογόνο και τα ηλεκτρικά συστήματα, καθώς και η εφαρμογή αποτελεσματικών πρακτικών για την εξοικονόμηση ενέργειας, έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές και να βελτιώσουν την αειφορία της βιομηχανίας. Παράλληλα, η ανάπτυξη λύσεων για τη μείωση των θαλάσσιων ρύπων είναι επίσης κρίσιμη.

Οι διεθνείς συμφωνίες και οι νομοθετικοί κανονισμοί παίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη της απανθρακοποίησης της ναυτιλίας, ενθαρρύνοντας την εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών και την παροχή κινήτρων για την υιοθέτηση πράσινων τεχνολογιών. Οι προσπάθειες αυτές απαιτούν όχι μόνο την συνεργασία της ναυτιλιακής βιομηχανίας, αλλά και την υποστήριξη της κυβέρνησης, των επενδυτών και της κοινωνίας γενικότερα.

Η απανθρακοποίηση στη ναυτιλία δεν είναι μόνο μια αναγκαιότητα για την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και μια ευκαιρία για τη βιομηχανία να εξελιχθεί και να προσφέρει βιώσιμες λύσεις για το μέλλον. Με τη συνεχή προσήλωση στην έρευνα, την καινοτομία και τη συνεργασία, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια ναυτιλιακή βιομηχανία που θα είναι βιώσιμη, αποτελεσματική και περιβαλλοντικά υπεύθυνη, παρέχοντας έτσι ένα καλύτερο μέλλον για τον πλανήτη και τις μελλοντικές γενιές.

## 7. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] S. H. Schneider, The greenhouse effect: science and policy., 1989.
- [2] D. W. O. B. A. M. K. A. D. K. B. D. E. A. O.-M. A. T. Q. a. B. B. A. Kweku, Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming., 2018.
- [3] A. R.-M. Y. S. J. W. Jos Delbeke, The Paris Agreement, 1st Edition επιμ., 2019.
- [4] C. Fetting, The European green deal., ESDN report, 2020.
- [5] A. Chircop, The IMO initial strategy for the reduction of GHGs from international shipping., 2019.
- [6] T. K. S. L. J. a. A. J. Joung, The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050, 2020.
- [7] M. Z. P. a. d. K. J. Polakis, The energy efficiency design index (EEDI), 2019.
- [8] A. VI, 2012 Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP), 2012.
- [9] M. a. T. B. Boviatsis, A comparative analysis between EU MRV and IMO DCS—the need to adopt a harmonised regulatory system., 2019.
- [10] IMO, «EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>.
- [11] J. Jensen, The LNG revolution., 2003.
- [12] J. G. Speight, Natural gas: a basic handbook., Gulf Professional Publishing, 2018.
- [13] H. Z. J. H. P. Z. Qiuwen Wang, «The use of alternative fuels for maritime decarbonization: Special marine environmental risks and solutions from an international law perspective,» 2023.
- [14] P. B. J. L. C. S. L. S. J. H. A. a. S. I. Balcombe, How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies., 2019.
- [15] S. a. N. T. Wang, The adoption of liquefied natural gas as a ship fuel: A systematic review of perspectives and challenges., 2014.
- [16] J. Tollefson, Hydrogen vehicles: fuel of the future., 2010.
- [17] B. a. D. C. Zincir, Methanol as a fuel for marine diesel engines., 2021.
- [18] J. G. V. P. F. F. E. G. G. K. D. W. G. a. W. C. Ott, Methanol, 2000.
- [19] K. J. K. Z. M. A. W. M. M. S. M. S. a. M. C. Machaj, Ammonia as a potential marine fuel: A review., 2022.
- [20] R. Schlögl, Ammonia synthesis. In Handbook of heterogeneous catalysis, 2008.
- [21] A. Demirbas, Progress and recent trends in biofuels., 2007.
- [22] A. G. L. R. M. R. N. T. E. L. W. P. P. a. A. J. Pinto, Biodiesel: an overview., 2005.
- [23] S. S. R. a. S. A. Mekhilef, Comparative study of different fuel cell technologies., 2012.
- [24] G. a. B. S. Weaver, Marine applications of fuel cell technology., 2022.

- [25] G. Rutkowski, Study of Green Shipping Technologies-Harnessing Wind, Waves and Solar Power in New Generation Marine Propulsion Systems., 2016.
- [26] MAN, Retrofit & upgrade: Marine application: MAN PrimeServ, 2023.
- [27] Yara, «Yara Marine Technologies,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://yaramarine.com/>.
- [28] E. M. Power, «Aquarius Marine Solar Power,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-marine-solar-power>.
- [29] Ν. Μ. Κιμουλάκης, Κτιριακές Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2012.
- [30] IMO, Third IMO Greenhouse Gas Study 2014, London, UK: International Maritime Organization, 2014.