



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

«Τεχνολογίες Πράσινης Ναυτιλίας» Πτυχιακή Εργασία

Συγγραφέας
Ονοματεπώνυμο: Βασιλική Χούντα
ΑΜ: 51112107

Επιβλέπων Καθηγητής: Ισίδωρος Ιακωβίδης

Αθήνα, 2023

(κενή σελίδα)



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE**

“GREEN SHIPPING TECHNOLOGIES”

Thesis

Student name and surname: Vasiliki Chounta
Registration Number: 51112107

Supervisor: Isidoros Iakovidis

Athens, 2023

(κενή σελίδα)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή Εργασία:

Τεχνολογίες Πράσινης Ναυτιλίας
Green Shipping Technologies

Συγγραφέας:

Χούντα Βασιλική (Α.Μ. 51112107)

Επιβλέπων:

Ιακωβίδης Ισίδωρος Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Εξεταστική Επιτροπή

Ιακωβίδης Ισίδωρος,
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Λιβανός Γεώργιος
Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Σέρρης Μιχαήλ
Λέκτορας ΠΑ.Δ.Α.

Αθήνα, 2023

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Χούντα Βασιλική του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 51112107 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

Η Δηλούσα

Χούντα Βασιλική



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει στόχο να παρουσιάσει μια πληθώρα τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον που βρίσκονται σε τρέχουσα χρήση ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον στο χώρο της ναυπηγικής βιομηχανίας.

Με βάση τις ισχύουσες και τις επερχόμενες απαιτήσεις, καθώς και τους διεθνείς κανονισμούς που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος, αναμένεται το μέλλον της παγκόσμιας ναυτιλίας να είναι άμεσα συνδεδεμένο με φιλικότερες προς το περιβάλλον πρακτικές για τον περιορισμό στο ελάχιστο δυνατό του αποτυπώματος άνθρακα από τα πλοία μέχρι το 2050. Στην εργασία γίνεται περιγραφή των σημαντικότερων «πράσινων» τεχνολογιών, που μπορούν να συμβάλλουν στην επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων για τη ναυτιλία, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τεχνικές πληροφορίες για κάθε μία από τις τεχνολογίες αυτές.

Λέξεις Κλειδιά: *Πράσινη ναυτιλία, Πράσινα καύσιμα, Συστήματα καθαρισμού καυσαερίων, Αιολικά συστήματα πρόωσης, Φωτοβολταϊκά συστήματα πρόωσης, Κυψέλες καυσίμου, Υφαλοχρώματα υψηλής απόδοσης, Αερολίπανση γάστρας, Ανάλυση Κύκλου Ζωής*

ABSTRACT

The present work aims to present a variety of existing and near-future green shipping technologies of interest in the maritime industry. Addressing the current and upcoming environmental policies and regulations, it is understood that the path of the world shipping industry is heading to an environmentally friendly operation and decarbonization by 2050. A variety of environmentally friendly technologies that would help achieve those goals has been developed in this study, including basic technical information on each one of the technologies.

Keywords: *Green shipping, Green fuels, EGCS, Wind-assisted ship propulsion, PV, High performance antifouling, Air drag reduction, Energy saving devices, Life cycle analysis*

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	1
Abstract	2
Πίνακας Περιεχομένων	3
Κατάλογος Εικόνων.....	6
Συνοτομογραφίες	9
Κεφάλαιο 1: Η Παγκόσμια Ναυτιλία και η Περιβαλλοντική Ρύπανση	11
Κεφάλαιο 2: Κανονισμοί σχετικοί με θέματα περιβαλλοντικής προστασίας	14
2.1. Η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Θαλάσσιας Ρύπανσης από τα Πλοία (IMO: <i>Marpol 73/78</i>)	14
2.2. <i>Marpol Annex VI: TIER I, II & III</i>	14
2.3. <i>IMO 2020</i>	21
2.4. Εργαλεία και μέτρα για τον περιορισμό των ατμοσφαιρικών ρύπων	21
2.4.1. <i>EEDI</i>	21
2.4.2. <i>EEOI</i>	24
2.4.3. <i>EEXI</i>	24
2.4.4. <i>SEEMP</i> και <i>CII</i>	27
Κεφάλαιο 3: Καύσιμα φιλικά προς το περιβάλλον (green fuels)	32
3.1. Καύσιμα που βρίσκονται σε τρέχουσα χρήση.....	32
3.1.1. Βαρύ Πετρέλαιο / Μαζούτ (<i>Heavy Fuel Oil – HFO</i>).....	32
3.1.2. Ελαφρύ Πετρέλαιο Ή Diesel (<i>Marine Diesel Oil – MDO</i>)	33
3.1.3. Ναυτιλιακό Πετρέλαιο (<i>Marine Gas Oil – MGO</i>).....	33
3.1.4. Ναυτιλιακά Πετρέλαια Χαμηλής Περιεκτικότητας σε θείο (<i>LSFO, VLSFO, ULSFO</i>)	34
3.1.5. Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (<i>LNG</i>)	35
3.2. Εναλλακτικά Καύσιμα	36
3.2.1. Βιοκαύσιμα - <i>Biofuels</i>	36
3.2.2. Απλά Φυτικά ελαια – <i>Straight Vegetable Oil (SVO)</i>	37
3.2.3. <i>Biodiesel</i> – Μεθυλεστέρες Λιπαρών Οξέων (<i>Fatty-acid Methyl ester – fame</i>).....	38
3.2.4. Εξευγενισμένα φυτικά έλαια – (<i>Hydrotreated Vegetable Oil - HVO</i>)	40
3.2.5. Μεθανόλη	41
3.2.6. Αμμωνία	44
3.2.7. Υδρογόνο.....	45
Κεφάλαιο 4: Αρχές λειτουργίας στοιχείων καυσίμων (fuel cells) και εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση	48
4.1. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (<i>Alkaline Fuel Cell - AFC</i>)	49
4.2. Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC</i>)	50
4.3. Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικού άλατος (<i>Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC</i>)	51
4.4. Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (<i>Solid Oxide Fuel Cell – SOFC</i>)	53
4.5. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (<i>Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC</i>)	54

4.6. Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell - DMFC).....	56
4.7. Εφαρμογές των Κυψελών Καυσίμου στη Ναυτιλία.....	57
Κεφάλαιο 5: Αρχές λειτουργίας συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (EGCS).....	59
5.1. Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Καυσαερίων (<i>Wet Scrubbers</i>).....	59
5.2. Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Καυσαερίων Ανοιχτού Βρόγχου (<i>Open Loop Wet Scrubbers</i>).....	61
5.3. Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Καυσαερίων Κλειστού Βρόγχου (<i>Closed Loop Wet Scrubbers</i>).....	63
5.4. Υβριδικά Συστήματα Υγρού Καθαρισμού Καυσαερίων (<i>Hybrid Wet Scrubbers</i>)	65
5.5. Συστήματα Ξηρού Καθαρισμού Καυσαερίων (<i>Dry Scrubbers</i>)	66
Κεφάλαιο 6: Τεχνολογίες Αιολικής Πρόωσης, φωτοβολταϊκά & Κυματική Ενέργεια	69
6.1. Αιολικά Συστήματα πρόωσης (<i>Wind-Assisted Ship Propulsion – wasp</i>)	69
6.1.1. Μαλακά Ιστία (<i>Soft Sails</i>).....	71
6.1.2. Σταθερά Ιστία (<i>Fixed Sails</i>).....	72
6.1.3. Κυλινδρικά Ιστία (<i>flettner rotors</i>).....	73
6.1.4. Ειδικά ιστία τύπου Αετού	75
6.1.5. Πτέρυγες αναρρόφησης (<i>suction wings</i>).....	78
6.1.6. Ανεμογεννήτριες (<i>wind turbines</i>).....	79
6.1.7. Αεροτομές γάστρας (<i>hull sails/hull form</i>).....	81
6.2. Φωτοβολταϊκά συστήματα (PV).....	82
6.3. Συστήματα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας	85
Κεφάλαιο 7: Υφαλοχρώματα υψηλής απόδοσης (high performance antifouling coatings) και Αντιρρυπαντικές τεχνολογίες	88
7.1. Νέες Τεχνολογίες υφαλοχρωμάτων με βιοκτόνο δράση	90
7.1.1. Πολυμερή υφαλοχρώματα ελεγχόμενης απελευθέρωσης (<i>Control Depletion Polymer - CDP</i>)	90
7.1.2. Αυτολειαινόμενα συμπολυμερή υφαλοχρώματα (<i>Self Polishing Copolymer - SPC</i>)	91
7.1.3. Υβριδικά αυτολειαινόμενα (Self-Polishing) υφαλοχρώματα.....	92
7.2. «Πράσινες» τεχνολογίες υφαλοχρωμάτων με μη βιοκτόνες ουσίες	93
7.2.1. Μικροσκοπικές / νανοσκοπικές επιφανειακές δομές.....	93
7.2.2. Φυσικά αντιρρυπαντικά.....	94
7.2.3. Υδρόφιλες επικαλύψεις « <i>hydrogel</i> »	94
7.2.4. Υφαλοχρώματα με Ολισθηρές υγρές πορώδεις επιφάνειες (<i>Slippery liquid-infused porous surfaces - SLIPS</i>).....	95
7.2.5. Τεχνολογίες δυναμικής επιφάνειας.....	96
Κεφάλαιο 8 : Αερολίπανση Γάστρας – <i>Air Drag Reduction</i>	101
Κεφάλαιο 9: Συσκευές Εξοικονόμησης Ενέργειας και Επαύξησης Ταχύτητας	105
9.1. Εναλλακτικός σχεδιασμός έλικας	105
9.2. Σύστημα Πτερυγίων κεφαλής έλικας (<i>Propeller BOSS CAP FINS - pbcf</i>)	106
9.3. Δακτύλιος Εξισορρόπησης Ροής (<i>Propeller Duct</i>)	108
Κεφάλαιο 10: Αρχές ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) και εφαρμογές στη ναυτιλία	110
10.1. Περιγραφή της μεθόδου	110
10.2. Καθορισμός Στόχου και Πεδίου Εφαρμογής	114
10.3. Καταγραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής (<i>Life Cycle Inventory, LCI</i>)	117

10.4. Εκτίμηση Επιπτώσεων του Κύκλου Ζωής (<i>Life Cycle Impact Assessment, LCIA</i>) .	119
10.5. Ερμηνεία, Ανάλυση και Αξιολόγηση των Αποτελεσμάτων.....	120
Συμπεράσματα – Προτάσεις	121
Παραπομπές.....	125

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Χρονοδιάγραμμα υιοθέτησης και εφαρμογής των διεθνών κανονισμών για τη μείωση εκπομπών ρύπων στη ναυτιλία [16].....	15
Εικόνα 2. Εξελικτική πορεία ρύθμισης των εκπομπών SO _x και NO _x της διεθνούς ναυτιλίας ανά τα χρόνια [14].....	16
Εικόνα 3. Παγκόσμιος χάρτης περιοχών ελεγχόμενων εκπομπών (ECAs) (Πηγή: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Carte_des_zones_ECA_dans_le_monde.gif).....	18
Εικόνα 4. Διάγραμμα αναπαράστασης των Βαθμίδων του <i>IMO</i> για το <i>attained EEDI</i> [20].	24
Εικόνα 5. Σύνοψη κανονισμού EEXI [26].....	26
Εικόνα 6. Συγκριτικό διάγραμμα κανονισμών EEXI και EEDI [26].....	27
Εικόνα 7. Διάγραμμα βαθμολογιών της απόδοσης των πλοίων για <i>CII</i>	31
Εικόνα 8. Η τυπική μέθοδος παραγωγής <i>biodiesel</i> στη βιομηχανία [44].....	39
Εικόνα 9. Διαγραμματική αναπαράσταση λειτουργίας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου.	50
Εικόνα 10. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων.....	51
Εικόνα 11. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικού Άλατος.	53
Εικόνα 12. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Στερεού Οξειδίου.	54
Εικόνα 13. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος.	55
Εικόνα 14. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC).....	56
Εικόνα 15. Διάταξη συστήματος scrubber (Πηγή: https://www.naiaslabs.com/scrubber-water)	61
Εικόνα 16. Τυπική διάταξη του συστήματος καθαρισμού καυσαερίων υγρού τύπου ανοιχτού βρόγχου [63].	62
Εικόνα 17. Τυπική διάταξη του υγρού συστήματος καθαρισμού καυσαερίων κλειστού βρόγχου [63].	64
Εικόνα 18. Τυπική διάταξη υβριδικού συστήματος καθαρισμού καυσαερίων ανοιχτού και κλειστού βρόγχου [63].....	66
Εικόνα 19. Τυπική διάταξη συστήματος ξηρού καθαρισμού τοποθετημένο στην εξάτμιση κύριας μηχανής πλοίου [63].	67
Εικόνα 20. Σχέδιο συστήματος μαλακών ιστίων <i>DynaRig (A)</i> και εικόνα της θαλαμηγού <i>Maltese Falcon (2006) (B)</i> . (Πηγή: https://imperialseamarine.com/the-maltese-falcon/)	72
Εικόνα 21. Σχέδια πλοίου μεταφοράς οχημάτων <i>Orcelle Wind</i> με αναδιπλούμενα σταθερά ιστία (A) (Πηγή: <i>Wallenius Wilhelmsen ASA</i>) και τοποθέτησης σταθερών ιστίων (fixed sails) σε φορτηγό (B) (Πηγή: https://www.ship-technology.com/news/drax-forms-new-partnership/).....	73
Εικόνα 22. <i>E-ship1 (A)</i> , και <i>Maersk Pelican</i> με ρότορες (B) [67].	74
Εικόνα 23. Το φορτηγό πλοίο " <i>AFROS</i> " με εγκατεστημένους ρότορες [68] (A) , και το σύστημα <i>Rail Deployment</i> της <i>Anemoi Marine Technologies</i> [70] (B)	75

Εικόνα 24. Διαδοχικές φάσεις ανάπτυξης ιστίου τύπου αετού (<i>Kite Sails</i>) (Πηγή: https://skysails-group.com/wp-content/uploads/2022/01/SkySailsMarine_Brochure_EN_web.pdf).....	76
Εικόνα 25. Περιγραφή λειτουργίας του συστήματος <i>SkySails</i> στο πλοίο « <i>MS Beluga SkySails</i> » (Πηγή: https://gcaptain.com/ocean-kites-top-10-green-ship-designs/)	77
Εικόνα 26: Το πλοίο γενικού φορτίου <i>M/V Ankie</i> με σύστημα πτερύγων αναρρόφησης (A) και η πτέρυγα <i>eConowind</i> (B) [72].	79
Εικόνα 27. Αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος « <i>Vindskip</i> » της εταιρείας <i>Lade AS</i> με τις αεροτομές στον σχεδιασμό της γάστρας [77].	82
Εικόνα 28. Το <i>MS Turanor PlanetSolar</i> , το πρώτο ηλιακό πλοίο. (Πηγή: https://e-nautilus.gr/ms-turanor-planetsolar)	83
Εικόνα 29. Σχηματική αναπαράσταση υβριδικού συστήματος αποτελούμενο από φωτοβολταϊκά πάνελ (<i>PV</i>), μπαταρίες, κινητήρα <i>diesel</i> και σύστημα ηλεκτροδότησης από ξηρά (<i>cold-ironing</i>). (Πηγή: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218315688#fig1)	84
Εικόνα 30. Δοκίμιο φορτηγού πλοίου με σύστημα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (A, B), οι κινήσεις του πλοίου στον κυματισμό (Γ), και αναδίπλωση συστήματος πτερυγίων (Δ). .	87
Εικόνα 31. Σχηματική αναπαράσταση των τυπικών σταδίων ανάπτυξης της βιορύπανσης....	89
Εικόνα 32. Μηχανισμός δράσης υφαλοχρωμάτων CDP. (Πηγή: https://www.ashrae.gr/EEinS2015/EEinS2015_Gougoulidis.pdf).....	91
Εικόνα 33. Μηχανισμός δράσης υφαλοχρωμάτων του τύπου <i>SPC</i> . (Πηγή: https://www.ashrae.gr/EEinS2015/EEinS2015_Gougoulidis.pdf)	92
Εικόνα 34. Φωτογραφία οργανισμού με αντιρρυπαντικές ικανότητες και μικροσκοπική εικόνα των μικροδομών επιφάνειάς του, από Νούφαρο (A), Καρχαρία (B), Φύλλα Ρυζιού (C), Πόδια αμφίβιου εντόμου (<i>water strider</i>) (D), Φύλλο καλαμιάς (E), Γκέκο (F), Σκαθάρι (G), Πόδουλο (H), και Φύλλα <i>Salvinia molesta</i> (I) [83].	93
Εικόνα 35. Το σαρκοφάγο φυτό νηπενθές ή κανάτα (<i>pitcher plant</i>) (A). Δομή των <i>SLIPS</i> (B) [83].	95
Εικόνα 36. Φωτογραφία κόκκινης άλγης « <i>Dilsea carnososa</i> » που επιδεικνύει μια πολύ καθαρότερη επιφάνεια σε σύγκριση με το περιβάλλον της (A). Στοιχεία αρχής απόρριψης επιθηλιακής στοιβάδας από την κόκκινη άλγη (B). Μικροφωτογραφίες από επιθηλιακά κύτταρα ξεφλουδίσματος από την επιδερμίδα της κόκκινης άλγης (C & D) [83].	97
Εικόνα 37. Αντιρρυπαντικός μηχανισμός ηλεκτροενεργής δυναμικής επιφάνειας (το πράσινο χρώμα αναπαριστά τα βακτήρια) (A). Αντιρρυπαντικός μηχανισμός μέσω διαμόρφωσης δυναμικής επιφάνειας με πνευματική ενεργοποίηση (B). Αντιρρυπαντική δράση ελαστικών επιφανειών (C). Το μαλακό κοράλλι <i>Sarcophyton trocheliophorum</i> (i) και τα πλοκάμια του (ii), τεχνητά πλοκάμια με βάση τη μαλακή ελαστική σιλικόνη (iii) και αναπαράσταση του αντι-βιορρυπαντικού μηχανισμού στα μαλακά πλοκάμια (iv) (D) [83].	100
Εικόνα 38. Συστήματα αερολίπανσης με έγχυση αέρα στον πυθμένα του πλοίου: Αερολίπανση με φυσαλίδες (a), Μεταβατικό στάδιο από στρώμα φυσαλίδων σε στρώμα αέρα (b), Αερολίπανση με στρώμα αέρα (c), Μερική ολίσθηση με κοιλότητες αέρα (d), Μερική ολίσθηση με κοιλότητες αέρα σε κυματισμό (e), [90] Σύστημα έγχυσης αέρα στον πυθμένα του πλοίου (f), Διάγραμμα σχηματισμού στρώματος αερολίπανσης από φυσαλίδες (g) [91].	103
Εικόνα 39. Σχηματική αναπαράσταση πλοίου με σύστημα κοιλοτήτων αέρα (ACS) [91].	104

Εικόνα 40. Έλικα Τύπου <i>Kappel</i> τοποθετημένη στο φορτηγό πλοίου M/T Nordamerika (Πηγή: www.mek.dtu.dk/KAPPEL_Propeller)	106
Εικόνα 41. Σύγκριση Συστροφής Ροής, πριν (Α) και μετά (Β) την τοποθέτηση ΡΒCF, (Πηγή: Mitsui O.S.K. Lines www.mol.co.jp)	107
Εικόνα 42. Διαφορά γωνίας πρόσπτωσης (α) της ροή στα πτερύγια της έλικας για μικρή V_A (Α) και για μεγάλη V_A (Β) , και Αρχές Εξοικονόμηση Ενέργειας δακτυλίων (Γ) [97].	108
Εικόνα 43. Είδη δακτυλοειδών αγωγών έλικας (<i>ducts</i>). Περιστρεφόμενος κρεμαστός δακτύλιος (Α) , Περιστρεφόμενος δακτύλιος με κάθετη στήριξη (Β) , και Σταθερός δακτυλοειδής αγωγός (Γ) [98].	109
Εικόνα 44: Μεθοδολογία εφαρμογής της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (<i>LCA</i>) ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας (104).	113
Εικόνα 45. Τυπικό Διάγραμμα ροής διαδικασίας σε μια ανάλυση κύκλου ζωής (105).	118
Εικόνα 46. Οι ναυτικές τεχνολογίες πρόωσης κατά σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας...	124

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

AER Annual Efficiency Ratio

ACS Σύστημα αερολίπανσης κοιλότητας αέρα (*Air Caviry System*).

ALDR Αερολίπανση με στρώμα αέρα (*Air Layer Drag Reduction*)

ASV Αυτόνομα (ρομποτικά) Οχήματα Επιφανείας (*Autonomous Surface Vehicles*)

BDR Αερολίπανση με φυσαλίδες (*Bubble Drag Reduction*)

CII Δείκτης Έντασης Άνθρακα (*Carbon Intensity Indicator*)

CPP Έλικα Μεταβλητού Βήματος (*Controllable Pitch Propeller*)

DWT Νεκρό βάρος πλοίου (*Dead Weight*)

ECA Περιοχή Ελεγχόμενων Ρύπων (*Emission Control Area*)

EEDI Energy Efficiency Design Index

EEOI Energy Efficiency Operational Indicator

EEXI Energy Efficiency Existing Ship Index

EGCS (*Scrubbers*) Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων (*Exhaust Gas Cleaning Systems*)

EIA Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (*Environmental Impact Assessment*)

ESD Συσκευή Εξοικονόμησης Ενέργειας (*Energy Saving Device*)

EU Ευρωπαϊκή Ένωση (*European Union*)

FAME Μεθυλεστέρες Λιπαρών Οξέων (*Fatty-Acid Methyl Ester*)

FPP Έλικα Σταθερού Βήματος (*Fixed Pitch Propeller*)

GHG Αέρια του Θερμοκηπίου (*Green House Gasses*)

GT ή **GRT** Ολική χωρητικότητα πλοίου (*Gross Register Tonnage*)

HFO Heavy Fuel Oil

HVO Hydrotreated Vegetable Oil

IFO Intermediate Fuel Oil

IMO Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (*International Maritime Organization*)

ISO Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (*International Organization for Standardization*)

LCA Ανάλυση Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Analysis*)

LCC Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Costing*)

LCI Καταγραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Inventory*)

LCIA Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Impact Assessment*)

LNG Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (*Liquefied Natural Gas*)

LPG Υγραέριο (*Liquefied Petroleum Gas*)

LSFO *Low Sulphur Fuel Oil*

MARPOL *The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*

MDO *Marine Diesel Oil*

MEPC Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (*Marine Environment Protection Committee*)

MFA Ανάλυση Ροής Υλικών (*Material Flow Analysis*)

MGO *Marine Gas Oil*

MIPS Ανάλυση υλικών ανά μονάδα υπηρεσίας (*Material Input per Service unit*)

MRV EU *Monitoring, Reporting and Verification Regulation*

NT ή **NRT** Καθαρή χωρητικότητα πλοίου (*Net Register Tonnage*)

OHE Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών

PBCF Σύστημα Πτερυγίων Καπακιού Έλικας (*Propeller Boss Cap Fins*)

PCDR Σύστημα αερολίπανσης μερικής ολίσθησης (*Partial Cavity Drag Redustion*).

PM *Particulate Matter*

RA Εκτίμηση Επικινδυνότητας (*Risk Assessment*)

SEA Στρατηγική Περιβαλλοντικής Εκτίμηση (*Strategic Environmental Assessment*)

SEEMP *Ship Energy Efficiency Management Plan*

SVO *Straight Vegetable Oil*

UCO *Used Cooking Oil*

ULSFO *Ultra-Low Sulphur Fuel Oil*

VLSFO *Very Low Sulphur Fuel Oil*

WASP Αιολικά Συστήματα Πρόωσης (*Wind-Assisted Ship Propulsion*)

WHO Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (*World Health Organization*)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Οι θαλάσσιες μεταφορές και η ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελούν σημαντικό κομμάτι της οικονομικής ανάπτυξης κάθε χώρας που βρέχεται από τη θάλασσα. Η ναυτιλία αποτελεί βασικό στοιχείο για την παγκόσμια ανάπτυξη, με περίπου 90% των μεταφορών παγκοσμίως να εκτελείται μέσω θαλάσσης.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του 2021¹, ο παγκόσμιος εμπορικός στόλος έχει συνολικό εκτόπισμα 2.116.401 DWT και συνολικό αριθμό 53.973 πλοίων άνω των 1000 GT [1]. Ακολούθως παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία του παγκόσμιου εμπορικού στόλου από το 2016 μέχρι και το 2021 (Πίνακας 1), όπως καταγράφηκαν από το UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) [1].

Πίνακας 1. Στατιστικά στοιχεία παγκόσμιου εμπορικού στόλου 2016-2021 [2].

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
DEADWEIGHT (DWT)	1.794.029	1.850.606	1.920.052	1.972.007	2.053.514	2.116.401
ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ DWT (%)	3,37	3,15	3,75	2,71	4,13	3,06
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ	49.445	50.090	51.480	52.417	53.275	53.973
ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΛΟΙΩΝ (%)	2,03	1,30	2,78	1,82	1,64	1,31
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΠΛΟΙΩΝ	36.283	36.946	37.297	37.622	38.546	39.212
ΡΥΘΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΠΛΟΙΩΝ (%)	1,31	1,83	0,95	0,87	2,46	1,73
ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΛΟΙΟΚΤΗΣΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΩΝ 15 ΧΩΡΩΝ (%)	80,79	79,64	81,11	81,30	81,22	80,77

¹ Τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους πίνακες αφορούν την πιο πρόσφατη δημοσίευση (έτος 2021) στατιστικών στοιχείων της εταιρείας UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) [1].

Για το ίδιο έτος (2021) οι 15 κορυφαίες χώρες που αντιπροσωπεύουν το 80,77% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου (με βάση το *DWT*) είναι η Ελλάδα, η Κίνα, η Ιαπωνία, η Σιγκαπούρη, το Χονγκ Κονγκ, η Γερμανία, η Κορέα, η Νορβηγία, οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, οι Βερμούδες, η Γαλλία, η Ταϊβάν, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Δανία και το Βέλγιο. Αξίζει να σημειωθεί πως με βάση τα δεδομένα του παγκόσμιου εμπορικού στόλου του 2021 σε σύγκριση με τα δεδομένα του 2016, οι πρώτες τρεις χώρες με την μεγαλύτερη πλοιοκτησία την τελευταία πενταετία έχουν διατηρηθεί οι ίδιες: η Ελλάδα, η Ιαπωνία και η Κίνα.

Κάθε χρόνο υπάρχει αύξηση στις ναυτιλιακές δραστηριότητες, γεγονός θετικό για την παγκόσμια κοινότητα. Παρ' όλα αυτά, τα πλοία προκαλούν σε κάποιο βαθμό ρύπανση στο περιβάλλον, είτε μέσω των λειτουργικών δραστηριοτήτων τους, είτε λόγω ατυχημάτων.

Οι δραστηριότητες που σχετίζονται με τις θαλάσσιες μεταφορές εκπέμπουν μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ανά τόνο και χιλιόμετρο² συγκριτικά με άλλους τύπους μεταφορών, αλλά δεδομένης της ιδιαιτερότητας των θαλάσσιων μεταφορών, η ναυτιλία συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στη ρύπανση του περιβάλλοντος [3]. Σε έρευνα του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (*IMO*) που αφορούσε τα εκπεμπόμενα αέρια του θερμοκηπίου το 2020 [4], υπολογίστηκε ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία εκπέμπει στην ατμόσφαιρα περίπου 1,1 *Gtn* διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) (γεγονός που υποδηλώνει πως οι εκπομπές CO_2 από την ναυτιλιακή βιομηχανία παρουσιάζουν αύξηση κατά 10% την τελευταία δεκαετία σε σύγκριση με τα προηγούμενα χρόνια), και συμβάλλει σε ποσοστό 2,5 - 3,0 % των ετήσιων ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως. Επιπλέον, παράγονται περίπου 2,3 *Mtn* διοξειδίου του θείου (SO_2) και 3,2 *Mtn* διοξειδίου του αζώτου (NO_2) κάθε χρόνο [3]. Αξίζει να σημειωθεί πως, σύμφωνα με μελέτη του *Oceana* [5], η παγκόσμια ναυτιλία είναι ο έκτος μεγαλύτερος παραγωγός αερίων του θερμοκηπίου μετά τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, την Κίνα, τη Ρωσία, την Ινδία και την Ιαπωνία. Η συμμετοχή της ναυτιλίας στη ρύπανση του περιβάλλοντος τείνει να αυξηθεί καθώς ο όγκος των θαλάσσιων μεταφορών υπολογίζεται πως αυξάνονται κατά 3,0 – 4,0 % κάθε χρόνο (Πίνακας 1). Ακόμα και τα αισιόδοξα σενάρια για την μείωση των εκπομπών CO_2 προβλέπουν αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας στην ναυτιλία σε

² Παρότι στη ναυτιλία επικρατεί η χρήση του όρου «τονο-μίλι», εδώ αναφέρεται ως «τόνος και χιλιόμετρο» καθώς συγκρίνεται με άλλους τύπους μεταφορών (πχ. σιδηροδρομικές μεταφορές).

ποσοστό 40 – 50 % μεταξύ των ετών 2015 και 2050 [3], ενώ άλλοι τομείς παγκοσμίως προχωρούν σε δραστικές λύσεις στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Παρά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η ναυτιλία δεν είχε ενταχθεί για πολλές δεκαετίες σε πλαίσιο ρυθμιστικών κανόνων. Αυστηροί στόχοι τέθηκαν για την ουσιαστική μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x), με καίρια τοποθέτηση του *IMO* το 2018 με στόχο να μειωθούν οι εκπομπές αυτών των αερίων που προέρχονται από τη παγκόσμια ναυτιλία τουλάχιστον μέχρι 50% και σε προκαθορισμένα στάδια μέχρι το 2050 [6].

Τα αποτελέσματα που έχει η επίδραση των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων στην ανθρώπινη υγεία είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια, καθώς εξαρτώνται άμεσα από το ίδιο το ρυπαντικό στοιχείο, τη συγκέντρωσή του, και τον χρόνο κατά τον οποίο εκτίθεται ο ανθρώπινος οργανισμός σε αυτό. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (*WHO*) [7], σχεδόν 1,3 εκατομμύρια άνθρωποι χάνουν την ζωή τους πρόωρα κάθε χρόνο στις πόλεις, ως αποτέλεσμα της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στην Ευρώπη, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (*EEA*), προκύπτουν 350.000 πρόωροι θάνατοι λόγω της υπερέκθεσης σε αιωρούμενα μικροσωματίδια (PM) και 200.000 πρόωροι θάνατοι λόγω έκθεσης σε υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης όζοντος (O_3) [8]. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (*WHO*) έχει επίσης ανακοινώσει πως η έκθεση σε αιωρούμενα μικροσωματίδια μεγέθους 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) ευθύνεται σε ποσοστό θανάτων 8% από καρκίνο των πνευμόνων, 5% από καρδιαγγειακές παθήσεις, και 3% από λοιμώξεις του αναπνευστικού παγκοσμίως [9]. Ακόμα, έχουν καταγραφεί αυξημένα ποσοστά περιστατικών νόσησης από λοιμώξεις του αναπνευστικού που συνδέονται με την έκθεση στο διοξείδιο του αζώτου (NO_2) [10]. Οι εκπομπές αιθάλης (*black carbon*) από τα καύσιμα των πλοίων συμβάλουν στην επιδείνωση της περιβαλλοντικής κρίσης του πλανήτη καθώς συνεισφέρουν στην αύξηση των επιπέδων θερμοκρασίας στη γη [11]. Τα αποτελέσματα που θα έχει η ρύπανση της ατμόσφαιρας στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον, είτε βραχυπρόθεσμα, είτε μακροπρόθεσμα, είναι σοβαροί λόγοι για την προσπάθεια μείωσης των αέριων ρύπων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΜΕ ΘΕΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

2.1. Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΣΥΜΒΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΛΗΨΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΠΛΟΙΑ (IMO: MARPOL 73/78)

Η διεθνής σύμβαση του 1973 για την πρόληψη των ρύπων των πλοίων (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*), που περιλαμβάνει και το πρωτόκολλο του 1978, έχει τεθεί σε ισχύ από το 1983. Αποτελείται από έξι παραρτήματα και δύο πρωτόκολλα, και έχει ως στόχο την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Ιστορικά, για πρώτη φορά το 1968, κατά τη διάρκεια της 23^{ης} συνόδου στη γενική συνέλευση του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), τέθηκε η ιδέα δημιουργίας μιας σύμβασης για όλα τα έθνη με σκοπό να καλύψει κάθε μορφή θαλάσσιας ρύπανσης [12]. Αργότερα [13], ο IMO πήρε την απόφαση να συγκαλέσει μια διεθνή διάσκεψη για τη ρύπανση της θάλασσας, με σκοπό τη δημιουργία μια συμβάσεων για τη μείωση της ρύπων των πλοίων, η οποία πραγματοποιήθηκε στο Λονδίνο το 1973. Από τη διάσκεψη υιοθετήθηκε η Διεθνής Συνθήκη για την Πρόληψη της Θαλάσσιας Ρύπανσης από τα Πλοία (*MARPOL*) αρχικά με πέντε παραρτήματα. Η Σύμβαση από το 1977 περιλαμβάνει έξι παραρτήματα και δύο πρωτόκολλα. Σε αντίθεση με τις μέχρι τότε συμβάσεις του *IMO* για τη ρύπανση της θάλασσας, η *MARPOL 73/78* αναφέρεται σε όλες τις μορφές θαλάσσιας ρύπανσης, είτε αυτή θεωρείται λειτουργική, είτε αποτέλεσμα ατυχήματος. Η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Θαλάσσιας Ρύπανσης από τα Πλοία (*MARPOL*) 73/78 έχει υιοθετηθεί από 158 χώρες οι οποίες εκπροσωπούν το 99,45% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου.

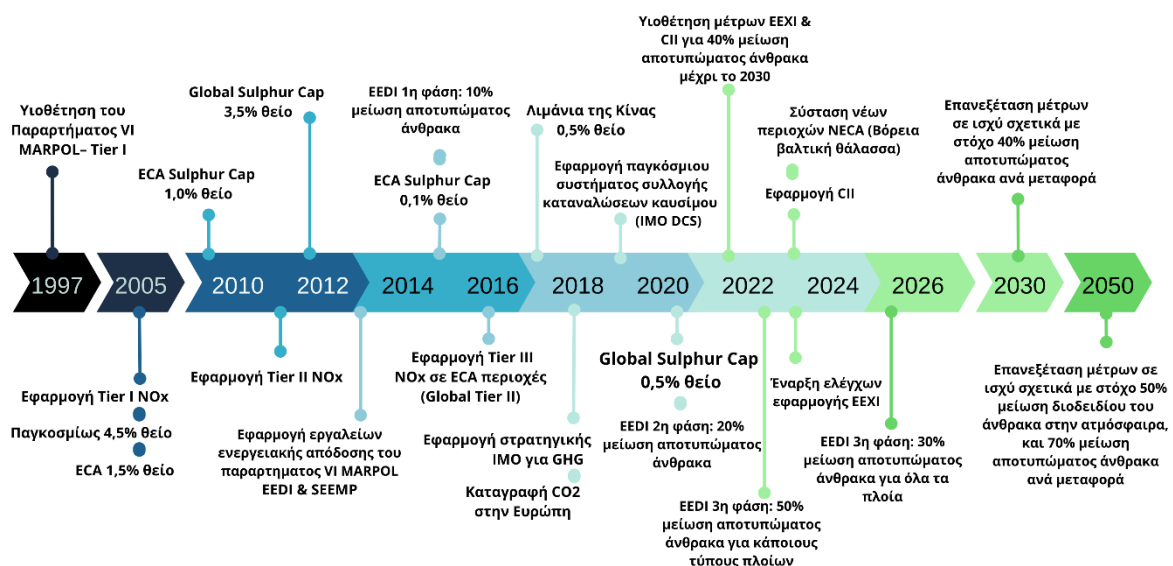
2.2. *MARPOL ANNEX VI: TIER I, II & III*

Ο *IMO* με το παράρτημα VI της *MARPOL* υιοθέτησε μέτρα ρύθμισης των εκπομπών του αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία, συμπληρώνοντας τη Διεθνή Σύμβαση *MARPOL 73/78* το 1997, η οποία τέθηκε σε ισχύ από το Μάιο του 2005 [14]. Στο παράρτημα αυτό περιλαμβάνεται εξειδίκευση των εκπομπών καυσαερίων των πλοίων στην ατμόσφαιρα, με αναφερόμενα τα οξειδία του θείου (SO_x), τα οξειδία του αζώτου (NO_x), τα αιωρούμενα

μικροσωματίδια (PM_x), και άλλες οργανικές ενώσεις που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος (ODS).

Τα πρότυπα που θα πρέπει να ακολουθήσουν τα πλοία για τις εκπομπές τους σύμφωνα με το παράρτημα VI αναφέρονται ως *Tier I, II & III*. Το *Tier I* ορίστηκε στην πρώτη έκδοση του παραρτήματος VI το 1997, ενώ τα *Tier II & Tier III* εισήχθησαν στις τροποποιήσεις που υιοθετήθηκαν το 2008 [15].

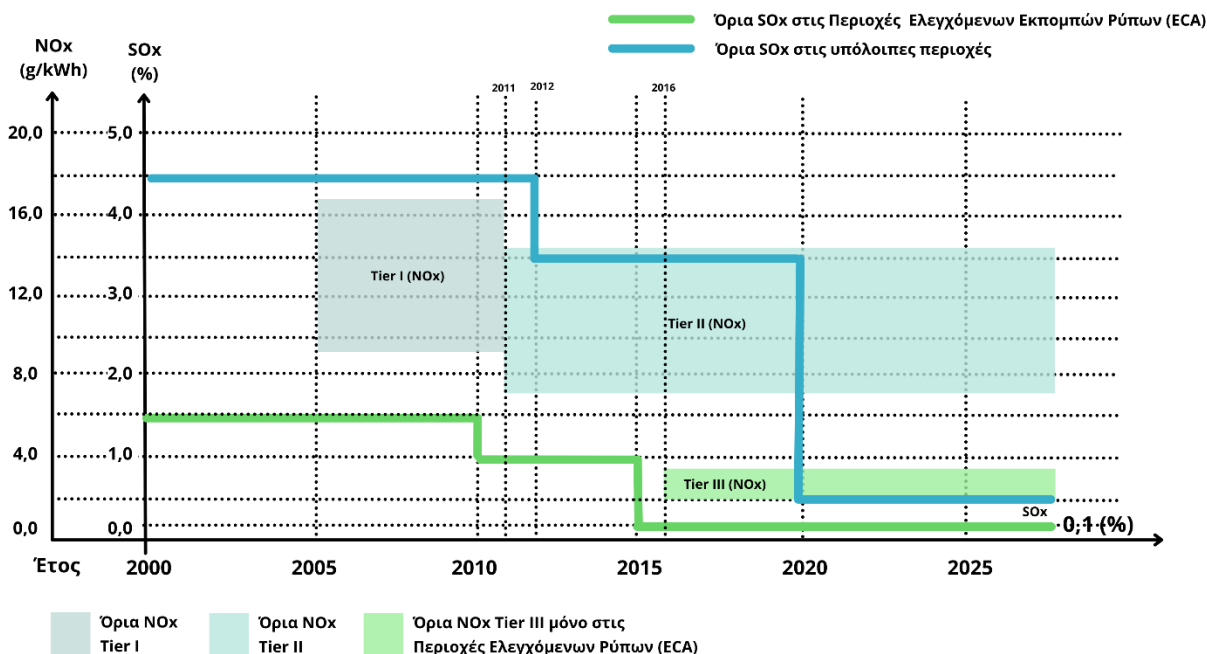
Στην Εικόνα 1 συνοψίζονται όλα τα μέτρα που αφορούν τις εκπομπές ρύπων στη ναυτιλία από την υιοθέτηση του Παραρτήματος VI της *MARPOL* το 1997 και την εφαρμογή του πρώτου προτύπου *Tier I* το 2005, μέχρι και την επανεξέταση των μέτρων που τέθηκαν ήδη, ή θα τεθούν σε ισχύ μέχρι το 2050.



Εικόνα 1. Χρονοδιάγραμμα υιοθέτησης και εφαρμογής των διεθνών κανονισμών για τη μείωση εκπομπών ρύπων στη ναυτιλία [16].

Η μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο στα ναυτιλιακά καύσιμα εκφράζεται σε ποσοστό κατά βάρος (w/w)%, και ως μέγιστο όριο έχει τεθεί η τιμή του 0,1% για τις περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών ρύπων (ECA) και σε 0,5% για τις υπόλοιπες περιοχές (Global Sulphur Cap) από την 1^η Ιανουαρίου του 2020.

Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη των ορίων SO_x και NO_x στις ECA και στις υπόλοιπες περιοχές στον κόσμο.



Εικόνα 2. Εξελικτική πορεία ρύθμισης των εκπομπών SO_x και NO_x από τη διεθνή ναυτιλία με την πάροδο του χρόνου [14].

Tier I – Πρωτόκολλο του 1997

Τέθηκε σε ισχύ 12 μήνες μετά την αποδοχή του [14] από 15 κράτη που κατείχαν πάνω από 50% της χωρητικότητας της παγκόσμιας ναυτιλίας στις 19 Μαΐου 2005, και έχει αναδρομική ισχύ για όλους τους κινητήρες πετρελαίου (*diesel*) άνω των 130 kW, σε πλοία κατασκευής μετά την 1^η Ιανουαρίου 2000 και σε πλοία που έχουν υποστεί ριζικές μετατροπές μετά την εν λόγω ημερομηνία. Ο ίδιος κανονισμός εφαρμόζεται για τις σταθερές και πλωτές εξέδρες και εξέδρες εξόρυξης ορυκτού πλούτου, χωρίς να υπολογίζονται οι εκπομπές που συνδέονται άμεσα με την έρευνα ή /και τον χειρισμό των ορυκτών κατά την εξόρυξη.

Tier II & III – Τροποποιήσεις του 2008

Τον Οκτώβρη του 2008 εγκρίθηκαν νέες τροποποιήσεις στο Παράρτημα VI [15] που εισήγαγαν νέες απαιτήσεις για την σύσταση και ποιότητα των καυσίμων των πλοίων με ισχύ από την 1^η Ιουλίου του 2011, νέα πρότυπα για τις εκπομπές NO_x καθώς και νέες απαιτήσεις για

τις εκπομπές από τις μηχανές που έχουν κατασκευαστεί πριν από το 2000. Οι τροποποιήσεις αυτές ψηφίστηκαν από 53 χώρες, εκπροσωπώντας στο σύνολο τους το 81,88% της παγκόσμιας χωρητικότητας.

Για τον έλεγχο των εκπομπών NO_x εισήχθη από τον IMO το Πιστοποιητικό EIAPP (*Engine International Air Pollution Prevention certificate*), το οποίο εκδίδεται κατά την τοποθέτηση κύριας μηχανής σε πλοίο [17]. Το πιστοποιητικό αυτό αφορά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου στα όρια που θέτουν ως Tier: όρια NO_x Tier III για συγκεκριμένους τύπους πλοίων ή/και κατά την πλεύση στις περιοχές ECA και όρια Tier II για τις υπόλοιπες περιοχές [18].

Παρακάτω συνοψίζονται (Πίνακας 2) οι οριακές τιμές και οι τύποι υπολογισμού των οριακών τιμών των εκπομπών NO_x των βαθμίδων Tier I-III, που βασίζονται στις ονομαστικές ταχύτητες των κινητήρων (n) και εκφράζονται σε RPM (στροφές ανά λεπτό).

Πίνακας 2. Τύποι υπολογισμού οριακών τιμών NO_x για Tier I-III [17].

ΒΑΘΜΙΔΑ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	ΟΡΙΟ NO _x (g/kWh)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ (RPM)
TIER I	2000	17	$n < 130$
		$45 \times n^{-0,2}$	$130 \leq n < 2000$
		9,8	$n \geq 2000$
TIER II	2011	14,4	$n < 130$
		$44 \times n^{-0,23}$	$130 \leq n < 2000$
		7,7	$n \geq 2000$
TIER III	2016*	3,4	$n < 130$
		$9 \times n^{-0,2}$	$130 \leq n < 2000$
		2	$n \geq 2000$
*μόνο για τις περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών ρύπων (ECA)			

Περιοχές Ελεγχόμενων Εκπομπών Ρύπων (ECAs)

Στις περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών ρύπων επιβάλλονται οι αυστηρότερες προϋποθέσεις και έλεγχοι για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία. Οι προϋποθέσεις αφορούν τον έλεγχο των εκπομπών οξειδίων του θείου SO_x και οξειδίων του αζώτου NO_x. Οι απαιτήσεις και τα γεωγραφικά όρια των περιοχών καθορίζονται από το

παράρτημα VI της σύμβασης *MARPOL* [19]. Υπάρχουν τέσσερις *ECAs*, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3:

- Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών της Βαλτικής Θάλασσας (όριο 0,1% w/w SO_x, υιοθετήθηκε το 1997 / ήρθε σε ισχύ το 2015, όριο 1,96 g NO_x /KWh υιοθετήθηκε το 2016/2021).
- Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών της Βόρειας Θάλασσας (όριο 0,1% w/w SO_x, υιοθετήθηκε το 2005 / 2006, όριο 1,96 g NO_x /KWh, υιοθετήθηκε το 2016/2021).
- Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών της Βόρειας Αμερικής (NAECA), περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της ακτογραμμής των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά (όρια 0,1% w/w SO_x και 2,0 - 3,4 g NO_x /KWh, υιοθετήθηκε το 2010/2012).
- Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών της Αμερικανικής ακτής της Καραϊβικής (US Caribbean ECA), περιλαμβάνει και το Πουέρτο Ρίκο και τα Αμερικανικές Παρθένους Νήσους (όρια 0,1% w/w SO_x και 2,0 - 3,4 g NO_x /KWh, υιοθετήθηκε το 2011/2014).



Εικόνα 3. Παγκόσμιος χάρτης περιοχών ελεγχόμενων εκπομπών (*ECAs*)
(Πηγή: https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Carte_des_zones_ECA_dans_le_monde.gif)

Από το παράρτημα VI της *MARPOL* [19] ορίζονται δύο είδη απαιτήσεων για τις εκπομπές καυσαερίων των πλοίων και της ποιότητας των καυσίμων. Αυτές διακρίνονται στις α) παγκόσμιες απαιτήσεις και β) στις αυστηρότερες απαιτήσεις με ισχύ σε όλα τα πλοία που

επισκέπτονται συγκεκριμένες ECAs για SO_x, NO_x, PMs ή και για όλους τους τύπους ρύπων ταυτοχρόνως.

MARPOL Special Areas and ECAs

Σύμφωνα με την εγκύκλιο MEPC.1/Circ.778/Rev.3 [20] από τον IMO, στα παραρτήματα I, IV & V ορίζονται κάποιες ειδικές περιοχές (*Special Areas*) που για τεχνικούς λόγους σχετικούς με τα ωκεανογραφικά και οικολογικά χαρακτηριστικά τους καθώς και την αυξημένη θαλάσσια κίνηση, χαρακτηρίζονται ως περιοχές στις οποίες κρίνεται απαραίτητη η υιοθέτηση μέτρων για την προστασία του περιβάλλοντος από πιθανή ρύπανση από πετρέλαιο, απόβλητα ή απορρίμματα, προερχόμενα από τα πλοία.

Ο Πίνακας 3 συνοψίζει τον κατάλογο των ειδικών περιοχών (*Special Areas*) και των περιοχών ελεγχόμενων ρύπων (*ECAs*) με αναφορά στις ημερομηνίες που τέθηκαν σε ισχύ αυστηρότερα μέτρα για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Πίνακας 3. Ειδικές Περιοχές (*Special Areas*) και Περιοχές Ελεγχόμενων Εκπομπών (*ECAs*) [18].

ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ (SPECIAL AREAS)	ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΙΣΧΥΟΣ ΒΑΣΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΣΕΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕΤΡΩΝ
ΜΑΡΡΟΛ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΕΡΙ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ			
ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	2 Οκτ. 1983
ΒΑΛΤΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	2 Οκτ. 1983
ΜΑΥΡΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	2 Οκτ. 1983
ΕΡΥΘΡΑ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	-
ΠΕΡΣΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ	-	-	1 Αυγ. 2008 (ΜΕΡC.168(56))
ΚΟΛΠΟΣ ΤΟΥ ΆΝΤΕΝ	1 Δεκ. 1987 (ΜΕΡC.29(25))	1 Απρ. 1989	-
ΑΝΤΑΡΚΤΙΚΗ	16 Νοεμ. 1990 (ΜΕΡC.42(30))	17 Μαρ. 1992	17 Μαρ. 1992
ΒΟΡΕΙΟ-ΔΥΤΙΚΑ ΕΥΡΩΠΑΪΚΑ ΎΔΑΤΑ	25 Σεπτ. 1997 (ΜΕΡC.75(40))	1 Φεβ. 1999	1 Αυγ. 1999 (ΜΕΡC.77(41))
ΠΕΡΙΟΧΗ ΟΜΑΝ ΤΗΣ ΑΡΑΒΙΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ	15 Οκτ. 2004 (ΜΕΡC.117(52))	1 Ιαν. 2007	-
ΝΟΤΙΟΑΦΡΙΚΑΝΙΚΑ ΎΔΑΤΑ	13 Οκτ. 2006 (ΜΕΡC.154(55))	1 Μαρ. 2008	1 Αυγ. 2008 (ΜΕΡC.167(56))
ΜΑΡΡΟΛ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV: ΠΕΡΙ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ			
ΒΑΛΤΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	15 Ιουλ. 2011 (ΜΕΡC.200(62))	1 Ιαν. 2013	1 Ιουν. 2019, 1 Ιουν. 2021, 1 Ιουν. 2023 (ΜΕΡC.275(69))
ΜΑΡΡΟΛ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΠΕΡΙ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ			
ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	1 Μαΐου 2009 (ΜΕΡC.172(57))
ΒΑΛΤΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	1 Οκτ. 1989 (ΜΕΡC.31(26))
ΜΑΥΡΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	-
ΕΡΥΘΡΑ ΘΑΛΑΣΣΑ	-	-	-
ΠΕΡΣΙΚΟΣ ΚΟΛΠΟΣ	-	-	1 Αυγ. 2008 (ΜΕΡC.168(56))
ΒΟΡΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΑ	17 Οκτ. 1989 (ΜΕΡC.36(28))	18 Φεβ. 1991	18 Φεβ. 1991 (ΜΕΡC.37(28))
ΑΝΤΑΡΚΤΙΚΗ	16 Νοεμ. 1990 (ΜΕΡC.42(30))	17 Μαρ. 1992	17 Μαρ. 1992
ΚΟΛΠΟ ΤΟΥ ΜΕΞΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΡΑΪΒΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	4 Ιουλ. 1991 (ΜΕΡC.48(31))	4 Απρ. 1993	1 Μαΐου 2011 (ΜΕΡC.191(60))
ΜΑΡΡΟΛ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI: ΠΕΡΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ (ECAS)			
ΒΑΛΤΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΑ (SO _x)	-	-	19 Μαΐου 2006
>> (NO _x)	7 Ιουλ. 2017 (ΜΕΡC.286(71))	1 Ιαν. 2019	1 Ιαν. 2021
ΒΟΡΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΑ (SO _x)	22 Ιουλ. 2005 (ΜΕΡC.132(53))	22 Νοεμ. 2006	22 Νοεμ. 2007
>> (NO _x)	7 Ιουλ. 2017 (ΜΕΡC.286(71))	1 Ιαν. 2019	1 Ιαν. 2021
ΒΟΡΕΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ (SO _x)	26 Μαρ. 2010 (ΜΕΡC.190(60))	1 Αυγ. 2011	1 Αυγ. 2012
>> (NO _x)			1 Ιαν. 2016
ΗΝΩΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΕΙΕΣ ΚΑΡΑΪΒΙΚΗ (SO _x)	15 Ιουλ. 2011 (ΜΕΡC.202(62))	1 Ιαν. 2013	1 Ιαν. 2014
>> (NO _x)			1 Ιαν. 2016

2.3. IMO 2020

Ένας από τους σημαντικότερους κανονισμούς για την μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία είναι η εφαρμογή του Παγκόσμιου Ανώτατου Ορίου Εκπομπών του Θείου από τον *IMO*. Το μέτρο αυτό τέθηκε σε ισχύ από την 1^η Ιανουαρίου του 2020 και αποτελεί νέα προσθήκη του παραρτήματος VI της *MARPOL* γνωστό και ως *IMO 2020* ή *Sulphur Cap*. Το Παγκόσμιο Όριο απαιτεί τον περιορισμό της περιεκτικότητας σε θείο στο 0,50% w/w (κ.β.) ή 5000 ppm στα ναυτιλιακά καύσιμα που χρησιμοποιούν τα πλοία σε πλόες εκτός των *SECA*.

2.4. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

Η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (*MEPC*) προχώρησε τον Ιούνιο του 2021 στην έκδοση νέων κανονισμών ως τροποποιήσεις στο Παράρτημα VI της σύμβασης *MARPOL*, με άξονα την στρατηγική του *IMO* περί μείωσης της περιβαλλοντικής ρύπανσης από τα πλοία. Οι κανονισμοί βασίζονται σε προηγούμενες απαιτήσεις απόδοσης των πλοίων, και αποσκοπούν σε επιπλέον μείωση των *GHG* που προέρχονται από τη ναυτιλία. Οι δείκτες που αναφέρονται παρακάτω αποτελούν τα εργαλεία των φορέων εκμετάλλευσης και διαχείρισης ποντοπόρων πλοίων για την μέτρησης της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων που διαχειρίζονται, με σκοπό να επιβεβαιωθεί η επίτευξη των καθορισμένων στόχων από τους νέους διεθνείς κανονισμούς.

2.4.1. EEDI

Ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Σχεδιασμού *EEDI* (*Energy Efficiency Design Index*) αφορά όλα τα νέα πλοία που κατασκευάστηκαν από το 2013 και έπειτα, και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τεχνικά εργαλεία που έχει στόχο τη χρήση νέων τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας. Ο *IMO* τον περιγράφει ως «μη ρυθμιστικό μηχανισμό που δίνει την επιλογή σε κάθε νέα τεχνολογία να βελτιώσει την απόδοση λειτουργίας του πλοίου σε συγκεκριμένο σχεδιαστικό πλαίσιο» [21]. Όσο η Ενεργειακή Απόδοση διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα, οι σχεδιαστές και οι παραγωγοί είναι ελεύθεροι να χρησιμοποιήσουν την πιο οικονομική λύση για το πλοίο ώστε να είναι σύμφωνο με τους κανονισμούς. Ο Δείκτης *EEDI* για συγκεκριμένο

σχεδιασμό πλοίου εκφράζεται ως τα γραμμάρια του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ανά τόνο-μίλι (όσο μικρότερος είναι ο δείκτης $EEDI$, τόσο ενεργειακά αποδοτικότερο είναι το πλοίο), και υπολογίζεται από μία εξίσωση βασισμένη στις τεχνικές προδιαγραφές του εκάστοτε πλοίου. Μια απλουστευμένη μορφή αυτής της εξίσωσης δίνεται παρακάτω (εξίσωση 1):

$$\begin{aligned}
 EEDI &= \frac{\text{Εκπομπές } CO_2}{\text{Μεταφορικό έργο}} = \\
 &= \frac{\text{Εγκατεστημένη ισχύς} \times \text{ειδική κατανάλωση καυσίμου} \times \text{περιεκτικότητα καυσίμου σε άνθρακα}}{\text{μεταφορική ικανότητα} \times \text{ταχύτητα}} \\
 &= \frac{\text{Περιβαλλοντικό Κόστος}}{\text{Κοινωνικό Όφελος}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Με τον δείκτη $EEDI$ εκφράζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας σε σύγκριση με το κοινωνικό της όφελος. Η εξίσωση υπολογισμού του $EEDI$ ενός πλοίου λαμβάνει υπόψη τον σχεδιασμό και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου, τις σχεδιαστικές του ανάγκες, την ικανότητα ανάκτησης ενέργειας, τη χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, τη συμπεριφορά του πλοίου στους κυματισμούς, και την ανάγκη προστασίας της γάστρας από τον πάγο για πλοία ειδικού σκοπού. Αναφορικά, η παρακάτω εξίσωση παρουσιάζει τις τεχνικές προδιαγραφές που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό του $EEDI$ για δεδομένο πλοίο [22] (εξίσωση 2).

$$\begin{aligned}
 EEDI &= \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_j \cdot \chi \omega \rho \eta \tau \iota \kappa \omicron \tau \eta \tau \alpha \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \\
 &\frac{\left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)}{f_j \cdot \chi \omega \rho \eta \tau \iota \kappa \omicron \tau \eta \tau \alpha \cdot V_{ref} \cdot f_w} - \frac{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_j \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Όπου:

- ME η κύρια μηχανή ή μηχανές, και AE οι ηλεκτρομηχανές,
- P η ισχύς των μηχανών σε KW,
- C_F ο συντελεστής μετατροπής της κατανάλωσης καυσίμου και της περιεκτικότητας του καυσίμου σε άνθρακα.

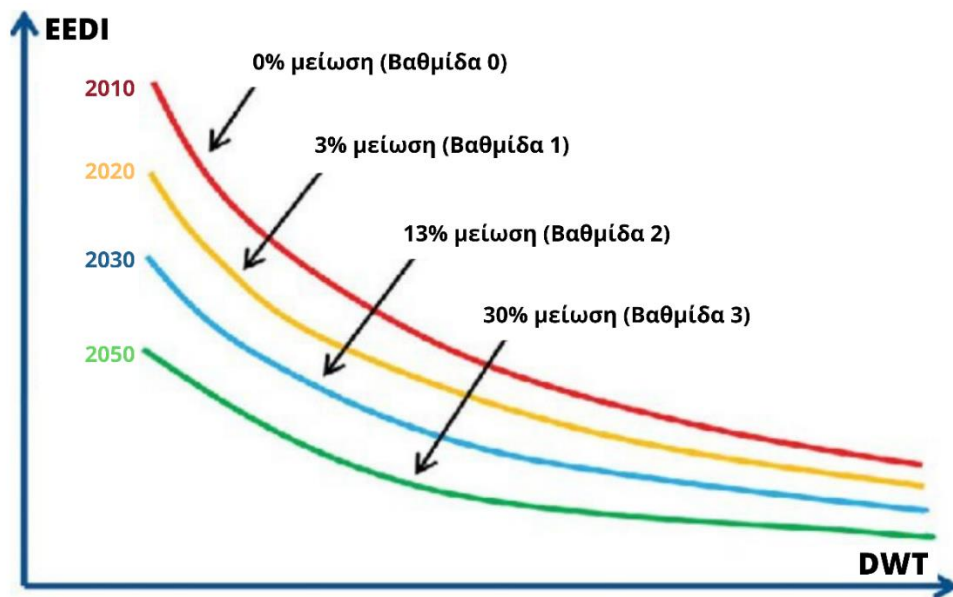
- SFC η ειδική κατανάλωση των μηχανών (g/KWh),
- Χωρητικότητα ($deadweight$ ή $gross tonnage$) σε τόνους,
- f_j ο συντελεστής διόρθωσης για τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πλοίου, π.χ. προστασία από πάγο,
- f_i ο συντελεστής χωρητικότητας για τα όρια στην χωρητικότητα λόγω τεχνικών προδιαγραφών ή κανονισμών,
- $f_{eff(i)}$ ο συντελεστής διαθεσιμότητας κάθε καινοτόμου ενεργειακά αποδοτικής τεχνολογίας,
- V_{ref} η ταχύτητα αναφοράς του πλοίου (nm/h),
- f_w αδιάστατος συντελεστής που εκφράζει την μείωση της ταχύτητας σε συγκεκριμένες συνθήκες ύψους κύματος, συχνότητας και ταχύτητας αέρα.

Ο $EEDI$ που θα πρέπει να επιτευχθεί ($attained EEDI$) υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση (2), είναι μοναδικός για κάθε πλοίο και εκφράζει κατά προσέγγιση την ικανότητα του πλοίου να γίνει ενεργειακά αποδοτικότερο. Για κάθε πλοίο προετοιμάζεται μία τεχνική αναφορά στην οποία παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του δείκτη $EEDI$ που αντιστοιχεί στο πλοίο. Το $attained EEDI$ προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση (3):

$$attained EEDI \leq required EEOI = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \times \text{καμπύλη αναφοράς } EEDI \quad (3)$$

Όπου το X είναι ποσοστιαίος συντελεστής μείωσης και προκύπτει από το είδος του πλοίου, το μέγεθος του, την χωρητικότητα, και την βαθμίδα του $EEDI$ που απαιτείται όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς από το 2013 μέχρι το 2025 και έπειτα, σε σύγκριση με την καμπύλη αναφοράς $EEDI$.

Από την έρευνα που ανέθεσε ο IMO στους *Lloyd's Register* και *DNV* το 2011 [23] προέκυψε πως με βάση τα κριτήρια που τίθενται από τους κανονισμούς που διέπουν το $EEDI$ για τα νέα πλοία, αναμένεται να υπάρξει μείωση των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO_2 από την παγκόσμια ναυτιλία σταδιακά σε ποσοστό 3% μέχρι το 2020, 13% μέχρι το 2030 και 30% μέχρι το 2050 (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Διάγραμμα αναπαράστασης των Βαθμίδων του *IMO* για το *attained EEDI* [20].

2.4.2. *EEOI*

Ο Δείκτης Λειτουργικής Ενεργειακής Απόδοσης *EEOI* (*Energy Efficiency Operational Indicator*) εκφράζει την απόδοση καυσίμου του πλοίου εν λειτουργία [21]. Ο δείκτης *EEOI* προσδιορίζει την επιρροή που έχει κάθε αλλαγή στην λειτουργία του πλοίου. Ενδεχόμενες μόνιμες «αλλαγές» που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του πλοίου είναι οι ακόλουθες: η βελτιστοποίηση του πλου, ο συχνότερος καθαρισμός της έλικας, η εισαγωγή νέων τεχνολογιών, όπως συστήματα ανάκτησης θερμότητας ή νέοι σχεδιασμοί ελίκων, και άλλα. Ο δείκτης *EEOI* έχει προταθεί από τη διεθνή ναυτιλιακή κοινότητα ως ένα εργαλείο για την παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης του κάθε πλοίου, και η εφαρμογή του είναι προαιρετική.

2.4.3. *EEXI*

Το Νοέμβριο του 2020 [24] κατά τη σύνοδο *MEPC75*, ο *IMO* ενέκρινε αλλαγές στο Παράρτημα VI της *MARPOL*, συστήνοντας έναν Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης Υπαρχόντων Πλοίων *EEXI* (*Energy Efficiency Existing Ship Index*). Ο δείκτης αυτός αφορά όλα τα πλοία άνω των 400 κόρων ολικής χωρητικότητας, που υπάγονται στο έκτο παράρτημα της *MARPOL*. Το

νέο μέτρο υιοθετήθηκε στη σύνοδο *MEPC76* τον Ιούνιο του 2021 [25]. Η απαίτηση τέθηκε σε εφαρμογή από την 1^η Νοεμβρίου του 2022.

Από τον υπολογισμό με βάση τον κανονισμό προκύπτουν δύο τιμές, μία για το *Attained EEXI* που είναι μοναδικό για κάθε πλοίο, και μία για το *Required EEXI* που προκύπτει με βάση την κατηγορία που ανήκει το πλοίο (τον τύπο δηλαδή) και το μέγεθος του. Για κάθε πλοίο που ανήκει σε μια συγκεκριμένη κατηγορία και για συγκεκριμένο μέγεθος, θα πρέπει να ισχύει:

$$\mathbf{Attained\ EEXI \leq Required\ EEXI} \quad (4)$$

Το *attained EEXI* είναι μοναδικό για κάθε πλοίο και ορίζεται ως τα γραμμάρια CO₂ που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από το πλοίο ανά τονο-μίλι που διανύει. Ο τύπος υπολογισμού φαίνεται στην εξίσωση 5.

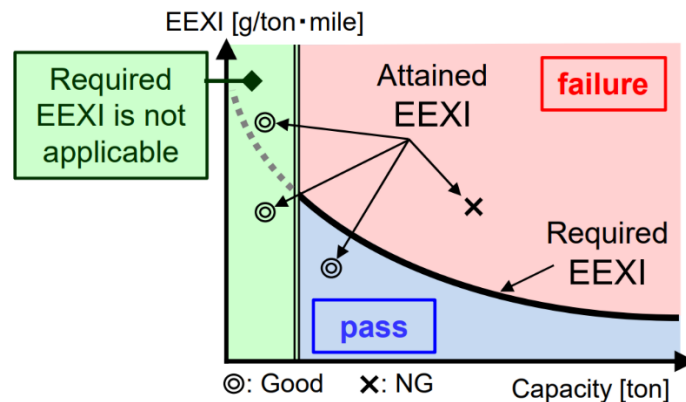
$$\begin{aligned} EEXI (g/t \cdot nm) = & \\ = & \frac{(\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} + P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \chi_{\omega\rho\rho\eta\tau\iota\kappa\omicron\tau\eta\tau\alpha} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \\ + & \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \chi_{\omega\rho\rho\eta\tau\iota\kappa\omicron\tau\eta\tau\alpha} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \\ - & \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \chi_{\omega\rho\rho\eta\tau\iota\kappa\omicron\tau\eta\tau\alpha} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \end{aligned} \quad (5)$$

Ο τύπος υπολογισμού του *EEXI* είναι παρόμοιος του *EEDI* (εξίσωση 2), με χρήση κάποιων επιπρόσθετων παραμέτρων.

Μια απλουστευμένη μορφή του τύπου είναι η παρακάτω:

$$EEXI (g/t \cdot nm) = \frac{\text{συντελεστής μετατροπής } CO_2 \text{ καυσίμου} \times \text{SFC } (g/KW \cdot h) \times \text{ισχύς κινητήρα } (KW)}{\text{χωρητικότητα } (ton) \times \text{ταχύτητα } EEXI V_{ref} (knot)} \quad (6)$$

Για όσα πλοία το υπολογισμένο *EEDI* βρίσκεται εντός των απαιτούμενων ορίων, δηλαδή $Attained EEDI \leq Required EEXI$, δεν απαιτείται η επανεξέταση του *EEXI*. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται διαγραμματικά μια σύνοψη του κανονισμού σχετικά με τον υπολογισμό του *EEXI*.



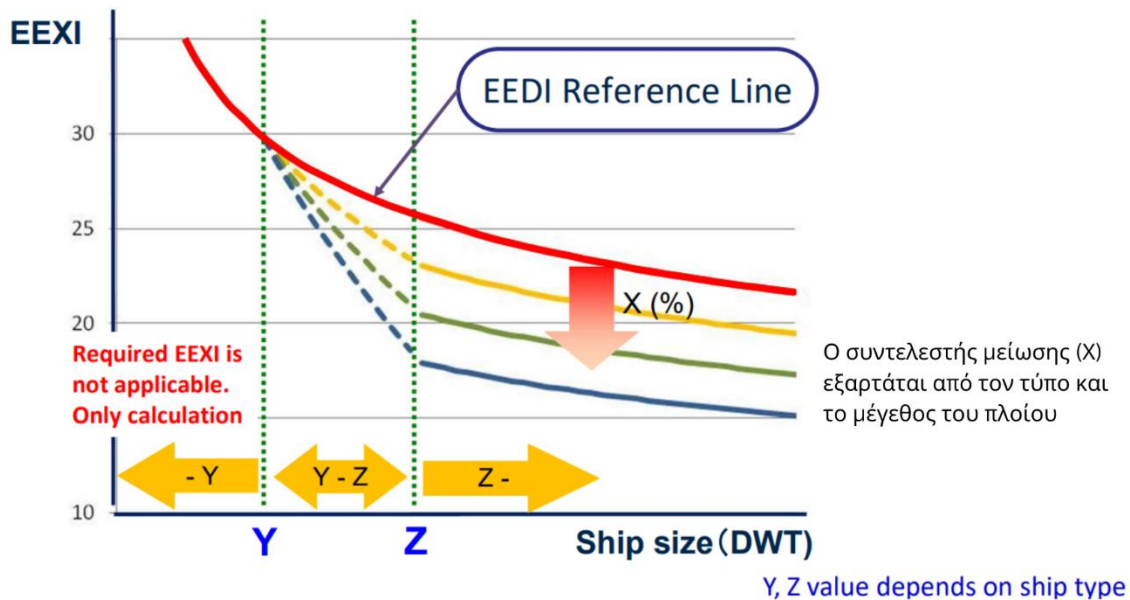
Εικόνα 5. Σύνοψη κανονισμού EEXI [26].

Το Required *EEXI* σε σχέση με την καμπύλη αναφοράς του *EEDI* και τον συντελεστή μείωσης που προκύπτει από το είδος του πλοίου, το μέγεθος του, την χωρητικότητα, και την βαθμίδα του *EEDI* που απαιτείται όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς από το 2013 μέχρι το 2025 δίνεται από τη σχέση 7.

$$Required EEXI = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \times \text{καμπύλη αναφοράς } EEDI \quad (7)$$

όπου *X* είναι ένας ποσοστιαίος συντελεστής μείωσης που προκύπτει με βάση το είδος του πλοίου, τη χωρητικότητα και το μέγεθος του από την καμπύλη αναφοράς του *EEDI* από το 2013 μέχρι το 2025.

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται διαγραμματικά η διαφορά των απαιτήσεων του κανονισμού *EEXI* με το *EEDI*.



Εικόνα 6. Συγκριτικό διάγραμμα κανονισμών *EEXI* και *EEDI* [26].

2.4.4. SEEMP ΚΑΙ CII

Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου *SEEMP* (*Ship Energy Efficiency Management Plan*) είναι ένα λειτουργικό μέτρο που στοχεύει στην εγκατάσταση ενός μηχανισμού που θα βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση του πλοίου με τη χρήση νέων και οικονομικά βέλτιστων τεχνολογιών. Το *SEEMP*, με τα εποπτικά μέσα που διαθέτει, παρέχει στις πλοιοκτήτριες εταιρείες μια διαχρονική προσέγγιση διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης του στόλου τους. Επιπλέον, η καθοδήγηση για την δημιουργία του σχεδίου διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης ερευνά και ενσωματώνει καλύτερες πρακτικές διαχείρισης καυσίμου για την λειτουργία των πλοίων [21]. Το *Ship Energy Efficiency Management Plan* εφαρμόζεται από το 2013 και έπειτα, για όλα τα υπάρχοντα και νέα πλοία.

Με τον κανονισμό υπ. αριθμό 26 του έκτου παραρτήματος της *MARPOL* [27] ο *IMO* υιοθέτησε νέες απαιτήσεις που αφορούν τη δημιουργία ενός σχεδίου διαχείρισης του αποτυπώματος άνθρακα του κάθε πλοίου, ως *SEEMP-Μέρος III* (*SEEMP Part III*). Επιπλέον, με

βάση νέες οδηγίες του κανονισμού υπ. αριθμό 28 του Παραρτήματος VI της MARPOL [28] που τέθηκαν σε ισχύ από την 1^η Ιανουαρίου 2023, για τα πλοία ολικής χωρητικότητας άνω των 5000 GT θα πρέπει να υπολογίζεται το ετήσιο αποτύπωμα άνθρακα (*Carbon footprint*) εντός δωδεκάμηνης περιόδου (από 1^η Ιανουαρίου μέχρι 31 Δεκεμβρίου).

Η καταγραφή και η επαλήθευση των εκπεμπόμενων οξειδίων του άνθρακα που εκλύεται είναι δυνατή μέσω του Δείκτη Έντασης Άνθρακα (*CII – Carbon Intensity Indicator*) σε σύγκριση με την απαιτούμενη τιμή για κάθε πλοίο [29]. Ο δείκτης *CII* δείχνει την αποδοτικότητα κατά τη λειτουργία του πλοίου, εκφραζόμενη ως εκπεμπόμενη ποσότητα CO₂ από το πλοίο, ετησίως, προς την ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου ανά ναυτικό μίλι. Αφορά όλα τα είδη πλοίων με μεταφορική ικανότητα μεγαλύτερη από 5000 GT.

Σε απλουστευμένη μορφή, το ετήσιο αποτύπωμα άνθρακα (*Attained Annual Operational CII*) υπολογίζεται ως ο λόγος της συνολικής μάζας του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα CO₂ (*M*) προς το συνολικό μεταφορικό έργο (*W*) [30]:

$$Attained\ CII_{ship} = M/W \quad (8)$$

Η συνολική ποσότητα του CO₂ (*M*) που εκπέμπεται υπολογίζεται ως το άθροισμα των εκπομπών CO₂ (σε γραμμάρια) που προέρχεται από την ετήσια κατανάλωση καυσίμου του πλοίου (εξίσωση 9):

$$M = FC_j \times C_{F_j} \quad (9)$$

Όπου:

- *j* ο τύπος του καυσίμου,
- *FC_j* ο συνολικός όγκος (σε γραμμάρια) του καυσίμου τύπου *j* που καταναλώνεται σε ένα ημερολογιακό έτος,
- *C_{F_j}*
 ο συντελεστής μετατροπής της κατανάλωσης καυσίμου και της περιεκτικότητας του καυσίμου τύπου *j* σε άνθρακα, σύμφωνα με την μέθοδο υπολογισμού του *EEDI* και ενδεχόμενες μελλοντικές αναθεωρήσεις του κανονισμού [21].

Το συνολικό έργο της μεταφορικής ικανότητας (*W*) ορίζεται ως το γινόμενο του μέγιστου νεκρού βάρους του πλοίου (για καλοκαίρι) summer *DWT* (σε τόνους), και της απόστασης

D_t που έχει πλεύσει μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος (σε ναυτικά μίλια) και υπολογίζεται με βάση την εξίσωση 10.

$$W = DWT \times D_t \quad (10)$$

Με βάση τα παραπάνω, ο γενικευμένος τύπος υπολογισμού του απαιτούμενου ετήσιου αποτυπώματος άνθρακα του πλοίου (*Attained Annual Operational CII*) είναι:

$$Attained\ CII_{ship} = \frac{FC_j \times C_{Fj}}{DWT \times D_t} \quad (11)$$

Ο τύπος υπολογισμού του *Attained CII* που περιλαμβάνει διορθωτικούς συντελεστές για κάθε τύπο πλοίου παρουσιάζεται παρακάτω (εξίσωση 12).

$$Attained\ CII_{ship} = \frac{\sum_j C_{Fj} \times \left\{ FC_j - \left(FC_{voyage,j} + TF_j + (0.75 - 0.03y_i) \times (FC_{electrical,j} + FC_{boiler,j} + FC_{others,j}) \right) \right\}}{f_i \times f_m \times f_c \times f_{iVSE} \times \text{Χωρητικότητα}^* \times (D_t - D_x)} \quad (12)$$

Όπου:

- TF_j διόρθωση για δεξαμενόπλοιο πολλαπλών δρομολογιών (*shuttle tanker*),
- $y_i = 0$ για το έτος 2023, $y_i = 1$ για το 2024, $y_i = 5$ για το 2025,
- $FC_{electrical,j}$, $FC_{boiler,j}$ & $FC_{others,j}$ οι καταναλώσεις για ηλεκτρική ενέργεια, λέβητα και άλλες λειτουργίες αντίστοιχα,
- f_i και f_m συντελεστές διόρθωσης χωρητικότητας για πλοία ενισχυμένα για συνθήκες πάγου,
- f_c συντελεστής διόρθωσης χωρητικότητας για δεξαμενόπλοια χημικών προϊόντων,
- f_{iVSE} συντελεστής διόρθωσης που αφορά πλοία εφοδιασμένα με μέσα φορτοεκφόρτωσης,
- D_x διόρθωση απόστασης

Για τις περιπτώσεις των πλοίων όπου το βάρος του μεταφερόμενου φορτίου αποτελεί κρίσιμο μέγεθος, για τον υπολογισμό του *CII* χρησιμοποιείται το Πηλίκιο Ετήσιας Αποδοτικότητας (*Annual Efficiency Ratio - AER*) του πλοίου με όλες τις προαναφερόμενες διορθώσεις *CII* [31]. Το *AER* υπολογίζει το αποτύπωμα άνθρακα σύμφωνα με τον κανονισμό *Poseidon Principles* [32] χρησιμοποιώντας τη μεταφορική ικανότητα (νεκρό βάρος) του πλοίου (*DWT*) στην σχέση 13 [33]:

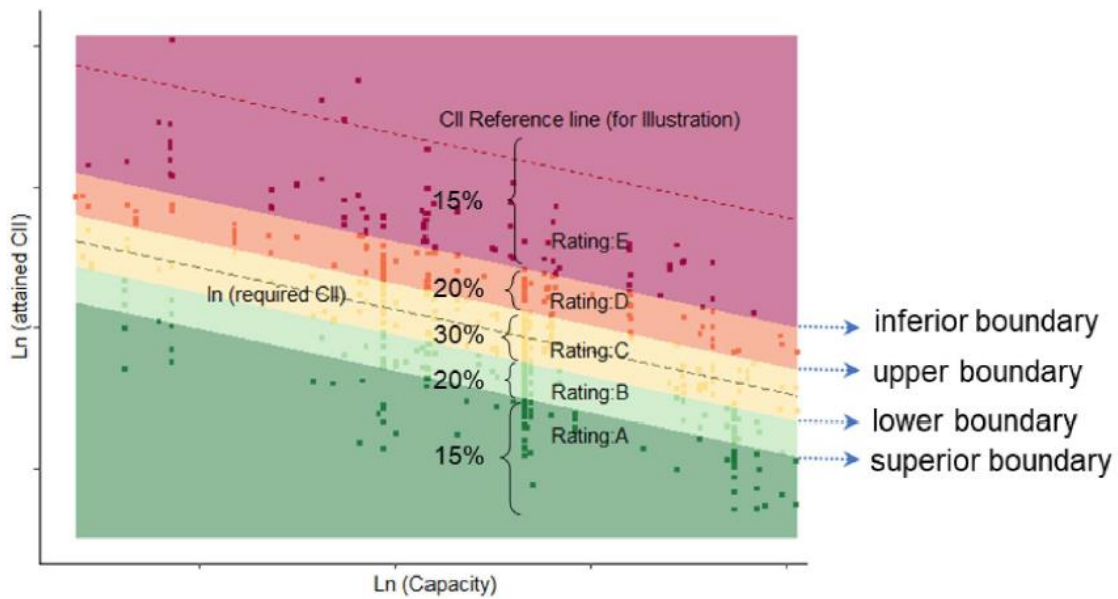
$$AER = \frac{C_i}{DWT \times D_i} \quad (13)$$

Όπου:

- C_i το σύνολο των ετήσιων εκπομπών άνθρακα για ταξίδια i , που προκύπτει από την κατανάλωση καυσίμου και το συντελεστή άνθρακα (*carbon factor*) για τον κάθε τύπο καυσίμου,
- *DWT* το νεκρό βάρος του πλοίου/μεταφορική ικανότητα, που υπολογίζεται ως η μάζα φορτίου, καυσίμων, προσώπων, προμηθειών, κ.ά., και
- D_i η απόσταση για ταξίδια i

Για τις περιπτώσεις των πλοίων όπου ο όγκος του μεταφερόμενου φορτίου αποτελεί κρίσιμο μέγεθος, για τον υπολογισμό του *CII* χρησιμοποιείται ο δείκτης *cgDIST* (*capacity gross ton Distance*) με όλες τις προαναφερόμενες διορθώσεις *CII* [31]. Ο *cgDIST* υπολογίζει το αποτύπωμα άνθρακα του πλοίου με βάση την ολική χωρητικότητα του πλοίου (*gross tonnage*), που εκφράζει το άθροισμα του όγκου όλων των καταμετρούμενων χώρων του πλοίου, ανά τόνο-μίλι.

Με βάση τις καταγραφές άνθρακα στο *CII* και την απόδοση του, το πλοίο χαρακτηρίζεται με βαθμολογία απόδοσης από Α – «Πολύ καλή» έως Ε – «Πολύ κακή». Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμολογιών της απόδοσης των πλοίων με βάση το *attained CII*.



Εικόνα 7. Διάγραμμα βαθμολογιών της απόδοσης των πλοίων για CII.

Τα πλοία που βαθμολογούνται με κακές αποδόσεις θα πρέπει να προβούν σε διορθωτικές ενέργειες με σκοπό να επιτύχουν βαθμολογία από C – «Μέτρια» και άνω.

Για όλες τις παραπάνω απαιτήσεις προβλέπεται να καταρτιστούν εκθέσεις σχετικά με την πορεία της απανθρακοποίησης και μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα, στη ναυτιλία, με την πρώτη βαθμολογία να δίνεται στις αρχές του 2024. Ο *IMO* έχει θέσει ως στόχο να επανεξετάσει την αποτελεσματικότητα των απαιτήσεων, μέχρι τις αρχές του 2026, και να υιοθετήσει περαιτέρω κανονισμούς, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο [34].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΥΣΙΜΑ ΦΙΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (GREEN FUELS)

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 της παρούσης εργασίας γίνεται αντιληπτό ότι οι διεθνείς κανονισμοί και τα όρια εκπομπών γίνονται όλο και πιο αυστηρά. Για πολλά χρόνια μικρές βελτιωτικές κινήσεις από την μεριά της πλοιοκτησίας ήταν επαρκείς ώστε να καλύψουν τις απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών. Φαίνεται, όμως, πως η ναυτιλία πλέον έχει ανάγκη από νέες βελτιωμένες τεχνολογίες καυσίμων ώστε να καταφέρει να υποστηρίξει αυτές τις αλλαγές. Στην ενότητα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι ισχύουσες και οι νεότερες τεχνολογίες καυσίμων, που πιθανόν να καταφέρουν να εκπληρώσουν την απαίτηση για μια πιο «καθαρή» ναυτιλία στο άμεσο μέλλον.

3.1. ΚΑΥΣΙΜΑ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΕ ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΧΡΗΣΗ

Τα πετρελαϊκά καύσιμα έχουν επικρατήσει ως προϊόντα χαμηλού κόστους. Εξαιρετικά δημοφιλής μετά τον δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οδήγησαν στην αλυσιδωτή δημιουργία πλοίων σχεδιασμένων να χρησιμοποιούν αυτά τα αρκετά παχύρευστα, και συχνά υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, καύσιμα. Παρόλα αυτά, με την πάροδο του χρόνου ξεκίνησαν να δημιουργούνται όλο και πιο επεξεργασμένες μορφές με στόχο τη συμμόρφωση με τα ανώτερα όρια εκπομπών ρύπων που τίθενται από τους κανονισμούς.

3.1.1. ΒΑΡΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ / ΜΑΖΟΥΤ (HEAVY FUEL OIL – HFO)

Το μαζούτ είναι ένα από τα πιο βαριά και πιο δημοφιλή καύσιμα στη ναυτιλία. Παράγεται από τα κατάλοιπα της διύλισης του αργού πετρελαίου και η ποιότητα του ποικίλει, καθώς εξαρτάται από τη διαδικασία διύλισης που ακολουθείται κατά την παραγωγή, αλλά και από τη σύσταση του αργού πετρελαίου (*crude oil*) που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη. Σύμφωνα με τους McGill *et al.* [35], το 77% της ναυτιλίας κατά το 2013 χρησιμοποιούσε μαζούτ ως καύσιμο. Τα κύρια χαρακτηριστικά του καυσίμου αυτού είναι το υψηλό ιξώδες του (700 cSt στους 50°C), πυκνότητα ίση με 1010 kg/m^3 , και η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο (3,50% κατά βάρος). Λόγω του υψηλού ιξώδους του, το βαρύ πετρέλαιο απαιτεί προθέρμανση πριν την εισαγωγή του στον θάλαμο καύσης, αλλά και διατήρηση συγκεκριμένης θερμοκρασίας κατά την αποθήκευση

του. Η χρήση του εμφανίζει μείωση μετά την εφαρμογή του *Global Sulphur Cap* το 2020 (κανονισμός για την εφαρμογή ορίων στις εκπομπές διοξειδίου του θείου), παρόλα αυτά εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στη ναυτιλία. Με σκοπό τη μείωση του μέγιστου ποσοστού περιεκτικότητας σε θείο στα ναυτιλιακά καύσιμα στο 0,50%, ο *IMO* επιτρέπει τη χρήση *HFO* μόνο υπό την προϋπόθεση παράλληλης λειτουργίας συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (*scrubbers*). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται απομάκρυνση των οξειδίων του θείου από τα καυσαέρια και “καθαρότερη” καύση του μαζούτ, που ισοδυναμεί με τις εκπομπές ενός καυσίμου περιεκτικότητας θείου κάτω του 0,50%.

3.1.2. ΕΛΑΦΡΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ Ή DIESEL (MARINE DIESEL OIL – MDO)

Το ελαφρύ *diesel* πετρέλαιο της ναυτιλίας παράγεται με ανάμειξη υδρογονανθράκων (που προέρχονται από συνδυασμό κλασμάτων απόσταξης πετρελαίου) και βαρέως πετρελαίου. Η βασική διαφορά του *diesel* με το βαρύ πετρέλαιο είναι ότι ένα καλής ποιότητας ελαφρύ *diesel* έχει αρκετά μικρότερο ιξώδες από το βαρύ πετρέλαιο, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται προθέρμανση πριν τη χρήση του. Εκτός του ότι δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία πριν την καύση, έχει επιπλέον το πλεονέκτημα ότι οι ιδιότητες του μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη διάφορων ουσιών με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση του κινητήρα. Η περιεκτικότητα θείου στα ελαφριά πετρέλαια *diesel* δεν ξεπερνά στο 3,5%, ενώ στην αγορά υπάρχουν και μείγματα με περιεκτικότητα σε θείο ίση με 1% [36]. Η τιμή αγοράς πετρελαίου *diesel* είναι υψηλότερη από την τιμή του μαζούτ.

3.1.3. ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ (MARINE GAS OIL – MGO)

Σε αντίθεση με τα πετρέλαια *diesel*, ο όρος “ναυτιλιακό πετρέλαιο” αναφέρεται σε όλα τα καύσιμα που παράγονται αποκλειστικά από κλάσματα απόσταξης του πετρελαίου. Αυτό σημαίνει ότι στα καύσιμα αυτά δε γίνεται ανάμειξη κλασμάτων απόσταξης με βαρύ πετρέλαιο.

Όπως και τα άλλα καύσιμα, η περιεκτικότητα σε θείο του παραγόμενου *Marine Gas Oil* μπορεί να ποικίλει [37]. Το ανώτατο επιτρεπτό ποσοστό περιεκτικότητας σε θείο του *MGO* είναι 1,5%, ενώ το Χαμηλής Περιεκτικότητας Θείου *MGO* (*Low-Sulphur Marine Gas Oil – LSMGO*) περιέχει θείο κάτω από 0,1% [38]. Το γεγονός αυτό, κάνει το *LSMGO* ιδανικό για πλοία που εισέρχονται σε περιοχές *ECA* και σε ευρωπαϊκά λιμάνια.

Το *MGO* είναι ένα καύσιμο που δε χρειάζεται προθέρμανση πριν εισαχθεί στη μηχανή για καύση. Παρόλα αυτά, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του συχνά χρειάζεται να γίνεται κατάλληλη ρύθμιση στο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου του πλοίου. Στις υπάρχουσες μηχανές των πλοίων, καύσιμα με μεγαλύτερη πυκνότητα είναι καταλληλότερα. Για το λόγο αυτό, αρκετοί πλοιοκτήτες τείνουν να προτιμούν καύσιμα όπως το *Very Low Sulphur Fuel Oil (VLSFO)* ή το *Ultra-Low Sulphur Fuel Oil (ULSFO)* αντί των *LSMGOs*.

3.1.4. ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΕΙΟ (*LSFO*, *VLSFO*, *ULSFO*)

Το *LSFO (Low Sulphur Fuel Oil)*, το *VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil)* και το *ULSFO (Ultra-Low Sulphur Fuel Oil)* αποτελούν τρεις βαθμίδες καυσίμων διαφορετικής περιεκτικότητας σε θείο, με την κάθε μία να περιέχει ένα μικρότερο ποσοστό θείο από την προηγούμενη βαθμίδα.

Ενώ το μαζούτ (*HFO*) περιέχει κατά προσέγγιση 3,5% θείο, το ποσοστό περιεκτικότητας στα καύσιμα αυτά είναι πολύ χαμηλότερο. Η πρώτη βαθμίδα, το *LSFO* περιέχει θείο σε ποσοστό 1%, και ως εκ τούτου έχει περιοριστεί η χρήση του από τους πλοιοκτήτες μετά το 2020, καθώς δεν καλύπτει τις απαιτήσεις των κανονισμών, αλλά δεν είναι και φθηνότερο από το *HFO* όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με *scrubber* [39]. Δημοφιλέστερη επιλογή είναι η δεύτερη βαθμίδα, το *VLSFO*, το οποίο είναι γνωστό και ως «καύσιμο του *IMO 2020*», και περιέχει 0,5% θείο, οπότε θεωρείται αποδεκτό για χρήση, με βάση τις οριακές τιμές που τέθηκαν σε ισχύ από την 1^η Ιανουαρίου του 2020. Όσον αφορά τις περιοχές *ECA* και τα λιμάνια της Ευρώπης, η πλοιοκτησία και οι ναυλωτές φαίνεται να προτιμούν το *Ultra-Low Sulphur Fuel Oil*. Με ποσοστό περιεκτικότητας σε θείο μόλις 0,1% το *ULSFO* αποτελεί την πιο «καθαρή» επιλογή καυσίμου.

Τα προαναφερθέντα καύσιμα είναι όλα παράγωγα αργού πετρελαίου που προκύπτουν μετά από κατάλληλη επεξεργασία της ίδιας πρώτης ύλης. Η τελική περιεκτικότητα σε θείο εξαρτάται από την διαδικασία αποθείωσης (*desulphurization*) στην οποία υπόκειται το προϊόν. Κατά τη διαδικασία της αποθείωσης, το θείο και οι θειικές ενώσεις απομακρύνονται με τη βοήθεια καταλυτών και χημικών πρόσθετων. Ως εκ τούτου η τελική τιμή του παραγόμενου καυσίμου αυξάνεται λόγω αυτής της επιπρόσθετης επεξεργασίας [40]. Αυτό σημαίνει πως τα πετρέλαια με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο θα έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με τα κλασικά πετρέλαια.

3.1.5. ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (LNG)

Μία από τις πιο γνωστές και υψηλής ζήτησης καύσιμη ύλη είναι το φυσικό αέριο (*Natural Gas*). Στις συνήθεις συνθήκες είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, στο οποίο προστίθεται ποσότητα κατάλληλης ουσίας ώστε να αποκτήσει χαρακτηριστική οσμή και να γίνεται άμεσα αντιληπτό σε περίπτωση διαρροής. Χαρακτηρίζεται ως ένα περιβαλλοντικά φιλικό καύσιμο όσον αφορά την καύση του, συγκριτικά με το πετρέλαιο ή τον γαιάνθρακα, καθώς για κάθε μονάδα παραγόμενης ενέργειας παράγονται ελάχιστες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Στα πλεονεκτήματα του περιλαμβάνεται το ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στη φυσική του μορφή, χωρίς να έχει ανάγκη περαιτέρω επεξεργασίας. Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) είναι ένα υγρό καύσιμο που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και μικρή ποσότητα αιθανίου (C_2H_6), που έχει υγροποιηθεί, με σκοπό την ευκολότερη αποθήκευση και διαχείριση του.

Για τον περασμένο μισό αιώνα, το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνταν από τα LNG Carriers, καθώς αποσυμπιεζόταν από υγρό σε αέριο με θέρμανση μέσα σε δεξαμενές LNG πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Επιτυγχάνεται έτσι η αυτο-πρόωση του πλοίου, με χρήση των κλασικών ατμοποιητών (*boilers* και άλλων συστημάτων) σε υβριδικές μηχανές διπλού καυσίμου. Στις μέρες μας, ολοένα και περισσότεροι κατασκευαστές μηχανών και ναυπηγοί κατευθύνονται προς την κατασκευή πλοίων για κάθε χρήση, που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG. Ο IMO στην έκθεση του 2015 με τίτλο «*Third GHG Study 2014*» [41], εκτιμά πως κατά το 2050 το μερίδιο του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως κύριο καύσιμο θα φτάσει το 25% για την παγκόσμια ναυτιλία.

Οι εκπομπές των μηχανών των πλοίων που χρησιμοποιούν LNG παράγουν 20-30% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) σε σύγκριση με αυτό που εκπέμπεται κατά την χρήση των κλασικών ναυτιλιακών πετρελαίων (όπως του HFO) [42]. Αν και αυτή η μείωση δεν μοιάζει σημαντική, η μείωση της ποσότητας αερίων, όπως τα οξείδια του θείου SO_x και τα οξείδια του αζώτου NO_x , στις αέριες εκπομπές είναι μεγάλης σημασίας. Εκ των πραγμάτων, με τη χρήση LNG οι εκπομπές NO_x μειώνονται περίπου 80 με 85%, ενώ καθώς το LNG δεν περιέχει θείο, οι εκπομπές SO_x εκμηδενίζονται [42]. Παρόλο που οι χαμηλές εκπομπές τοξικών αερίων στην ατμόσφαιρα είναι σημαντικές ώστε να υπάρχει συμμόρφωση με τους διεθνείς κανονισμούς, ο

κύριος λόγος που η πλοιοκτησία προτιμά να προσαρμόσει τον στόλο της σε πλοία που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο είναι το χαμηλό κόστος αγοράς του.

3.1.6. ΥΓΡΑΕΡΙΟ (LIQUEFIED PETROLEUM GAS - LPG)

Το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου, ή περισσότερο γνωστό ως υγραέριο, αποτελείται ένα μείγμα προπανίου και βουτανίου. Το προπάνιο είναι αέριο σε συνήθεις συνθήκες περιβάλλοντος, και έχει σημείο ζέσεως -42°C , ενώ υγροποιείται με εφαρμογή μέτριας πίεσης $8,4\text{ bar}$ και θερμοκρασία 20°C . Το βουτάνιο μπορεί να βρεθεί σε δύο μορφές: κανονικό βουτάνιο (*n-butane*) ή ισοβουτάνιο (*i-butane*), με σημείο ζέσεως $-0,5^{\circ}\text{C}$ και -12°C αντιστοίχως. Δεδομένου ότι και τα δύο ισομερή έχουν υψηλότερα σημεία βρασμού από το προπάνιο, υγροποιούνται σε χαμηλότερη πίεση [43]. Το υγραέριο έχει πολύ χαμηλή πυκνότητα, με αποτέλεσμα οι δεξαμενές LPG να είναι τυπικά τρεις φορές μεγαλύτερες από τις δεξαμενές πετρελαίου. Το υγραέριο παράγεται είτε ως ένα υποπροϊόν κατά την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου είτε ως κλάσμα απόσταξης κατά τη διύλιση του πετρελαίου.

3.2. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Η παγκόσμια ερευνητική κοινότητα, προσπαθώντας να ανταποκριθεί στην ανάγκη για τη δημιουργία «πράσινων» καυσίμων, έχει στραφεί προς την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών καυσίμου για την πρόωση των πλοίων. Η έρευνα αυτή συνοδεύεται από αντίστοιχη προσπάθεια ανάπτυξης της κατάλληλης τεχνολογίας για την ασφαλή χρήση τους.

3.2.1. ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ - BIOFUELS

Τα βιοκαύσιμα είναι καύσιμα παρόμοια με τα ορυκτά καύσιμα, αλλά προέρχονται από επεξεργασία της βιομάζας. Χρησιμοποιώντας βιομάζα για την παραγωγή βιοκαυσίμων, παρέχεται η δυνατότητα μηδενικού ισοζυγίου άνθρακα, καθώς σ' αυτή περιέχονται ενώσεις που έχουν σχηματιστεί κατά τον κύκλο του άνθρακα στη φύση. Ωστόσο, η επεξεργασία και η μεταφορά των βιοκαυσίμων έχει σημαντικό ενεργειακό αποτύπωμα, και οι εκπομπές που προκύπτουν από τη χρήση βιοκαυσίμων δεν οδηγούν σε μηδενικό ισοζύγιο. Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η εφαρμογή μέτρων μέσω της διαδικασίας που είναι γνωστή ως "αντιστάθμιση άνθρακα".

Η εκτεταμένη χρήση των βιοκαυσίμων στη ναυτιλία θα μπορούσε να προσφέρει μια νέα οπτική στην αναγκαία μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και να συνεισφέρει στη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, καθώς κατά την καύση τους απελευθερώνουν ελάχιστο ή μηδενικό θείο [44]. Παρόλο που τα πλοία ακόμα δεν λειτουργούν με καθαρά βιοκαύσιμα λόγω της χαμηλής παραγωγής του καυσίμου και του συγκριτικά υψηλότερου κόστους, τα βιοκαύσιμα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο αφού πρώτα αναμειχθούν με ορυκτά καύσιμα, με στόχο την μείωση των εκπομπών τοξικών αερίων κατά την καύση [45,46].

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα στην εφοδιαστική αλυσίδα, και η δημιουργία βιοκαύσιμης ύλης να μην ανταγωνίζεται την καλλιέργεια τροφίμων, η Ευρωπαϊκή Ένωση εφάρμοσε τον κανονισμό *RED-II*, έναν κανονισμό που θέτει ανώτατο όριο στη χρήση συγκεκριμένων ειδών βιοκαυσίμων [45]. Τα ανώτατα όρια στη χρήση βιοκαυσίμων στην αγορά έχουν τεθεί στο 7% για βιοκαύσιμα παραγωγής καλλιεργειών τροφίμων, και στο 1,7% από χρησιμοποιημένα μαγειρικά έλαια (*Used Cooking Oil - UCO*). Παρόλο που η ναυτιλία και οι αερομεταφορές προς το παρόν δεν ακολουθούν τον κανονισμό *RED-II*, η παραγωγή καυσίμων από καλλιέργειες τροφίμων ενδέχεται να μην επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης στους κλάδους αυτούς. Παρόλα αυτά, οι κανονισμοί τύπου *RED-II* μπορεί να έχουν θετικό αντίκτυπο για τη σταδιακή καθιέρωση της χρήσης βιοκαυσίμων και μεγαλύτερη βιωσιμότητα. Οι πιο σημαντικοί τύποι βιοκαυσίμων και οι εφαρμογές τους στην ναυτιλία αναφέρονται ακολούθως.

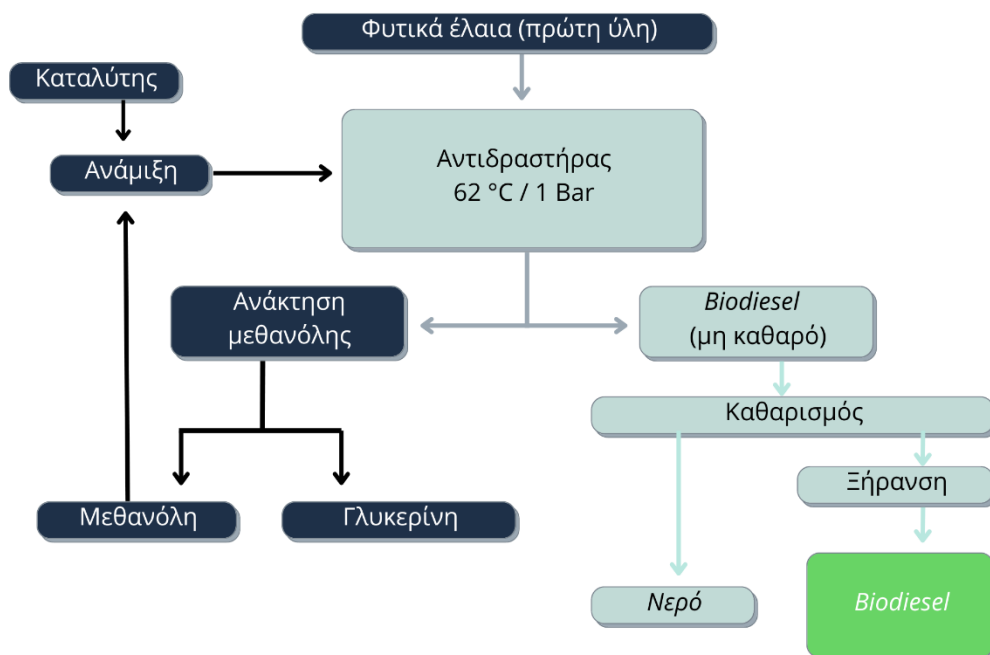
3.2.2. ΑΠΛΑ ΦΥΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ – *STRAIGHT VEGETABLE OIL (SVO)*

Τα απλά φυτικά έλαια (*SVOs*) είναι εκχυλίσματα ελαίων από φυτά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας ως κυρίως καύσιμο. Σύμφωνα με το *E4Tch* (2018) [46] και τους *Hsieh* και *Felby* (2017) [44], το *SVO* θα μπορούσε να εξελιχθεί σε εναλλακτικό καύσιμο αντί του *HFO* σε ντιζελοκινητήρες χαμηλής ταχύτητας. Ωστόσο, λόγω του υψηλού ιξώδους και του υψηλού σημείου ζέσεως, η χρήση του *SVO* μπορεί να προκαλέσει εναπόθεση άνθρακα στις μηχανές και πιθανή πήξη των λιπαντικών [44]. Επιπλέον, η χαμηλή θερμογόνος δύναμη του *SVO* μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, που έχει ως επακόλουθο την ανάγκη για συχνότερες στάσεις του πλοίου για ανεφοδιασμό καυσίμου [47]. Πιθανές λύσεις για τη μείωση του ρίσκου από την εναπόθεση άνθρακα αποτελεί, μεταξύ άλλων, η προθέρμανση του *SVO* πριν την είσοδο του στην μηχανή, η προσαρμογή των συστημάτων

έγχυσης καυσίμου στο υψηλότερο ιξώδες του *SVO*, ή η ανάμειξη του *SVO* με *HFO* [47]. Λόγω των προαναφερθέντων εμποδίων που προκύπτουν, η εφαρμογή του *SVO* σαν αυτούσιο ναυτιλιακό καύσιμο ή σε ανάμειξη με άλλο είδος καυσίμου απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις στους κινητήρες ντίζελ και στα συστήματα καυσίμου, όπως και στις υπάρχουσες πετρελαϊκές δομές. Ο κίνδυνος μείωσης της ζωής των μηχανών λόγω της εναπόθεσης άνθρακα που προκαλείται από την παρουσία του απλού φυτικού ελαίου σε μείγματα με ορυκτό καύσιμο, υπερτερεί των συνολικών πλεονεκτημάτων της χρήσης του [44].

3.2.3. BIODIESEL – ΜΕΘΥΛΕΣΤΕΡΕΣ ΛΙΠΑΡΩΝ ΟΞΕΩΝ (FATTY-ACID METHYL ESTER – FAME)

Το βιοντίζελ είναι ένα επεξεργασμένο παράγωγο του *SVO* που προκύπτει από τη μετατροπή των τριγλυκεριδίων των φυτικών ελαίων σε μεθυλο- (ή αιθυλο-) εστέρες, μέσω της διαδικασίας της μετεστεροποίησης. Κατά της διαδικασίας αυτή η αλκοόλη αντιδρά με το έλαιο και σχηματίζει νέους απλούστερους εστέρες απελευθερώνοντας τη γλυκερίνη κάθε τριγλυκεριδίου. Για να επιτευχθεί η αντίδραση αυτή είναι απαραίτητη η παροχή θερμότητας και η παρουσία ισχυρής βάσης που δρα ως καταλύτης (μέσω των ιόντων υδροξειδίου που παρέχει), ώστε να συμβάλει στην πλήρη μετατροπή των φυτικών ελαίων σε νέους εστέρες και γλυκερίνη. Η παραγόμενη γλυκερίνη μπορεί να καθαριστεί εκ νέου και να χρησιμοποιηθεί σε φαρμακευτικές βιομηχανίες και βιομηχανίες καλλυντικών. Για το βιοντίζελ χρησιμοποιούνται οι μονο-αλκυλεστέρες, των οποίων το τελικό ιξώδες φτάνει στο ένα όγδοο του αρχικού ιξώδους του *SVO*. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται η τυπική μέθοδος παραγωγής βιοντίζελ.



Εικόνα 8. Η τυπική μέθοδος παραγωγής *biodiesel* στη βιομηχανία [44].

Μία από τις προτεινόμενες αναλογίες ανάμιξης του μείγματος μεθυλεστέρων λιπαρών οξέων (*FAME*) με άλλο καύσιμο είναι ο συνδυασμός του με το *diesel*. Η χρήση του ως πρόσθετο καύσιμο σε ποσοστό μέχρι 20%, γίνεται εύκολα με το κανονικό *diesel* πετρέλαιο (*B20*). Το *FAME* (ως τύπος *biodiesel*) που προκύπτει είναι ελαφρώς βαρύτερο (μεγαλύτερης πυκνότητας) από το *diesel*, καθώς η πυκνότητα του φτάνει τα $0,88 \text{ g/cm}^3$, συγκριτικά με την τυπική τιμή του πετρελαϊκού *diesel* που κυμαίνεται μεταξύ $0,82 - 0,86 \text{ g/cm}^3$ στη συνήθη θερμοκρασία.

Το *FAME* ήδη χρησιμοποιείται σε οχήματα, αναμεμιγμένο σε ποσοστό 7% με *diesel*, με τον κωδικό EN590 *diesel* [46]. Στη ναυτιλία η χρήση του γίνεται ως πρόσθετο καύσιμο σε μείγμα περιεκτικότητας 5% βιοντίζελ και κυρίως σε μικρά σκάφη το παρόν. Δοκιμές σε μηχανές μεγαλύτερης ισχύος για την σταθερή χρήση του στην εμπορική ναυτιλία έχουν ήδη ξεκινήσει, και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το *FAME* θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μελλοντικό εναλλακτικό καύσιμο αντί του *MGO* ή του *MDO* σε ντιζελοκινητήρες χαμηλής και μέτριας ταχύτητας. Σύμφωνα με τους Hsieh και Felby [44], η παραγωγή του *FAME* από συγκεκριμένες καλλιέργειες τροφίμων δημιουργεί καύσιμο με σημείο θόλωσης *CP (cloud point)* υψηλότερο από αυτό του απλού *diesel*, με αποτέλεσμα την απόφραξη των φίλτρων και δυσκολία στην ροή του καυσίμου σε θερμοκρασίες κάτω των 32°C . Επιπλέον, το βιοντίζελ περιέχει όξινα προϊόντα

αποικοδόμησης (*acid degradation products*) τα οποία είναι ύποπτα για την πρόκληση βλαβών στις αντλίες καυσίμου, τα ακροφύσια έγχυσης, και τα ελατήρια του εμβόλου, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη παρακολούθησης της οξύτητας στα χαρακτηριστικά των καυσίμων [48]. Εντούτοις, η ανάμειξη *FAME* με υπάρχοντα ναυτιλιακά καύσιμα μέχρι ενός σημείου έχει εντυπωσιακά αποτελέσματα στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου για την ποντοπόρο ναυτιλία. Σύμφωνα με το *E4Tech* [46], η δυνατότητα μείωσης που έχει το βιοντίζελ στη παραγωγή εκπομπών *GHG* συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα μπορεί να φτάσει το 88%.

Η παραγωγή βιοντίζελ δεν απαιτεί συγκεκριμένο είδος καλλιέργειας τροφίμων, εφόσον το προϊόν της είναι κάποιο έλαιο. Οι επιλογές περιλαμβάνουν την κανόλα (ποικιλία ελαιοκράμβης), τα φοινικόδεντρα, την καρύδα, τη σόγια, το καλαμπόκι, τα ζωικά λίπη, και το χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι [46]. Προς το παρόν, τα *FAME*, *SVO* και *HVO*, παράγονται κυρίως από προϊόντα ελαίων βρώσιμων πηγών, όπως η σόγια, η κανόλα, η καρύδα, ο φοίνικας και το καλαμπόκι [49]. Όσο οι καλλιέργειες αυτές ανταγωνίζονται τη βιομηχανία τροφίμων, η βιωσιμότητα αυτών των καυσίμων είναι υπό αμφισβήτηση. Ιδανικά, τα βιοκαύσιμα όπως το *FAME* και το *HVO* θα έπρεπε να παράγονται από μη βρώσιμες και χαμηλού κόστους πρώτες ύλες, όπως ινδική αζαδιράχτη (*neem*), άλγη (φύκια), κάρυο του Μπαρμπάντος (*jatropha curcas*), *karanja* και χρησιμοποιημένα λάδια [49]. Επιλέγοντας μη βρώσιμες πρώτες ύλες, η παραγωγή των βιοκαυσίμων μπορεί να καταστεί βιώσιμη για το μέλλον.

3.2.4. ΕΞΕΥΓΕΝΙΣΜΕΝΑ ΦΥΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ – (HYDROTREATED VEGETABLE OIL - HVO)

Τα εξευγενισμένα φυτικά καύσιμα είναι προϊόντα κατεργασίας λιπαρών πρώτων υλών, όπως είναι τα φυτικά έλαια, τα ζωικά λίπη, ή τα χρησιμοποιημένα μαγειρικά λάδια (*UCO*), με υδρογόνο. Ο εξευγενισμός φυτικών ελαίων (ραφινάρισμα) είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα φυτικά έλαια υπόκεινται σε επεξεργασία με υδρογόνο με την παρουσία κατάλληλου καταλύτη, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μείγματος κορεσμένων ενώσεων [50]. Αυτή η διαδικασία απομακρύνει το επιπλέον οξυγόνο από τα έλαια, και οδηγεί σε καύσιμο μεγαλύτερης αποδοτικότητας [44]. Λόγω της υψηλής του ποιότητας και σταθερότητας, το *HVO* μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρόσθετο καύσιμο σε μείγμα με *diesel*. Παρόλα αυτά, για να φτάσει σε αυτή την ποιότητα, η διαδικασία παραγωγής είναι περισσότερο κοστοβόρα από την διαδικασία παραγωγής του *FAME* ή του *SVO* [46].

3.2.5. ΜΕΘΑΝΟΛΗ

Η μεθανόλη (ή μεθυλική αλκοόλη) είναι η απλούστερη αλκοόλη. Το μόριό της αποτελείται από ένα άτομο άνθρακα, και ο χημικός τύπος της είναι CH_3OH , ενώ συντομογραφικά παριστάνεται και ως $MeOH$. Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα χημικά καύσιμα στην παγκόσμια αγορά. Ιστορικά, η μεθανόλη παραγόταν παλαιότερα μέσω πυρόλυσης ξύλου (ξηρή απόσταξη λιθανθράκων) απ' όπου και προέρχεται η παλαιότερη ονομασία της "ξυλόπνευμα". Η μεθανόλη, στις συνήθεις συνθήκες, είναι άχρωμο, πτητικό και εύφλεκτο τοξικό υγρό, με οσμή οινόπνευματώδη. Εκτός από καύσιμο, χρησιμοποιείται και για την παραγωγή μεθυλο-τριτοταγούς βουτυλαιθέρα (*Methyl,t-Butyl,Ether* ή *MTBE*), το οποίο χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στη βελτίωση του αριθμού οκτανίου της βενζίνης, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων από τα οχήματα [51]. Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθανόλης και του πετρελαίου ντίζελ.

Πίνακας 4. Βασικά χαρακτηριστικά Μεθανόλης και Ντίζελ.

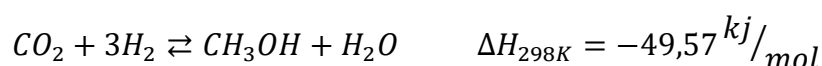
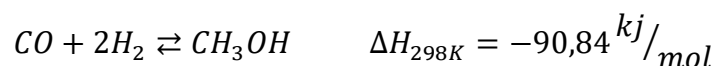
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΜΕΘΑΝΟΛΗ	ΝΤΙΖΕΛ
ΤΥΠΟΣ	CH_3OH	$C_{12}H_{26}-C_{14}H_{30}$
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m^3)	790	830
ΚΑΤΩΤΕΡΗ ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ (MJ/kg)	19,9	42,6
ΕΥΦΛΕΚΤΟΤΗΤΑ (ποσοστό % στον αέρα)	6,7 - 36	1,85 - 8,2
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ	5	45 - 50
ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΚΤΑΝΙΟΥ	109/89	15 - 25
ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΘΕΙΟ (%)	0	3,5 max

Η διαδικασία παραγωγής μεθανόλης στηρίζεται σε βιομηχανικές μεθόδους που παράγουν το αέριο σύνθεσης της μεθανόλης, γνωστό ως "syngas", ή αλλιώς "synthesis gas". Το αέριο αυτό είναι ένα μείγμα υδρογόνου (H_2), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), και μικροποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Ο άνθρακας που απαιτείται για την παραγωγή του syngas προέρχεται κυρίως από φυσικό αέριο (κατά 65%) και από γαιάνθρακες (κατά 35%),

ενώ σε ένα μικρό ποσοστό (γύρω στο 1%) χρησιμοποιείται και η βιομάζα [52]. Το ενδιαφέρον της χρήσης βιομάζας για την παραγωγή της μεθανόλης αποτελεί ένδειξη της ανάγκης της αγοράς να υιοθετήσει πρακτικές περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον. Η χρήση της βιομάζας είναι προς το παρόν περιορισμένη, αλλά ενδέχεται στο μέλλον να αυξηθεί η παραγωγή βιοκαυσίμων με χρήση αυτής της πρώτης ύλης.

Ενδεικτικά, τα στάδια για την παραγωγή του *syngas* από φυσικό αέριο, που αποτελεί και τον πιο διαδεδομένο τρόπο επεξεργασίας, είναι τα εξής:

- Καθαρισμός της τροφοδοσίας με τη μέθοδο της υδρο-αποθείωσης (*hydrodesulfurization*): Κατά το στάδιο αυτό γίνεται ο καθαρισμός του φυσικού αερίου με την προσθήκη υδρογόνου. Το υδρογόνο διασπά τον δεσμό άνθρακα και θείου, και βοηθά στην αποθείωση του αερίου, προκειμένου να αποφευχθεί η απενεργοποίηση των καταλυτών των επόμενων σταδίων [52].
- Δημιουργία *syngas*: Η διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί είτε ως αναμόρφωση με ατμό (*steam reforming*), με μερική οξείδωση (*partial oxidation*), με αυτοθερμική αναμόρφωση (*autothermal reforming*), με ξηρή αναμόρφωση (*dry reforming*), είτε με συνδυαστική αναμόρφωση (*combined reforming*) [52]. Από τους προαναφερθέντες τρόπους επεξεργασίας συνήθως χρησιμοποιούνται η αναμόρφωση με ατμό και η αυτοθερμική αναμόρφωση ή ο συνδυασμός αυτών των δύο.
- Σύνθεση της μεθανόλης: Ως καταλύτες, που επιτρέπουν στο παραγόμενο *syngas* να μετατραπεί σε μεθανόλη, χρησιμοποιούνται κατάλληλες ενώσεις του *Cu*. Κατά την αντίδραση για την μετατροπή του *syngas* σε μεθανόλη, το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα αντιδρούν με το υδρογόνο παρουσία του καταλύτη, όπως φαίνεται στις αντιδράσεις που ακολουθούν [53]:



- Καθαρισμός της μεθανόλης: κατά το στάδιο αυτό η ακάθαρτη μεθανόλη που περιέχει νερό και άλλα προϊόντα όπως ο διμεθυλαιθέρας και άλλες αλκοόλες, καθαρίζεται σε αποστακτικές στήλες. Στην πρώτη στήλη απομακρύνονται οι προσμείξεις με μικρό σημείο ζέσεως, και στη συνέχεια, σε μια δεύτερη στήλη απόσταξης, σε υψηλότερες θερμοκρασίες απομακρύνεται το νερό που περιέχεται στο μείγμα.

Στην Κίνα, όπου ο γαιάνθρακας είναι διαθέσιμος σε μεγάλες ποσότητες λόγω των φυσικών πόρων του υπεδάφους, η παραγωγή μεθανόλης μέσω γαιάνθρακα είναι περισσότερο διαδεδομένη. Τα στάδια που περιλαμβάνει η παραγωγική διαδικασία είναι παρόμοια με αυτά της παραγωγής μεθανόλης από φυσικό αέριο, διαφέρουν όμως τα πρώτα δύο στάδια που αφορούν την προετοιμασία και επεξεργασία του γαιάνθρακα. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την αεριοποίηση του γαιάνθρακα (*gasification*) σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (800 - 1350°C) και πίεση 20-25 bar. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει τον καθαρισμό (*purification*) του παραγμένου *syngas*, από αμμωνία, θειούχες ενώσεις και άλλα υλικά που περιέχονται ως προσμείξεις στο γαιάνθρακα (38).

Η παραγωγή «πράσινης» μεθανόλης από βιομάζα θεωρείται μια μη ρυπογόνος, φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος και παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για την διεθνή ναυτιλιακή κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Η μέθοδος παραγωγής μεθανόλης από βιομάζα προσομοιάζει εκείνη της παραγωγής μέσω γαιάνθρακα, και περιλαμβάνει επεξεργασία, αεριοποίηση και καθαρισμό του προϊόντος. Το κύριο πλεονέκτημα της βιομάζας είναι η σύνδεσή της με τον κύκλο ζωής του άνθρακα. Η παραγόμενη από την καύση ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα ισούται με εκείνη που απορροφάται κατά την φωτοσύνθεση (μηδενικό ισοζύγιο), οπότε συνολικά δεν εκλύεται διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον.

Ως πλεονέκτημα της χρήσης μεθανόλης για ναυτιλιακό καύσιμο θεωρείται η ευκολία αποθήκευσης της, καθώς διατηρείται σε υγρή μορφή σε συνθήκες περιβάλλοντος. Επίσης, η μεθανόλη είναι συμβατή με τις υπάρχουσες υποδομές καυσίμων που ήδη χρησιμοποιούνται.

Αξίζει να σημειωθεί πως για την παραγωγή και χρήση μεθανόλης, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι συνολικά 18% χαμηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες εκπομπές παραγωγής και χρήσης του *diesel* [54].

3.2.6. ΑΜΜΩΝΙΑ

Η αμμωνία είναι μια χημική ένωση που αποτελείται από τα στοιχεία άζωτο (82.35% κατά βάρος) και υδρογόνο (17.65% κατά βάρος). Συναντάται ως άχρωμο αέριο που υγροποιείται εύκολα με πίεση και χαρακτηρίζεται από την έντονη χαρακτηριστική οξεία οσμή της. Ο χημικός τύπος της είναι NH_3 . Είναι ισχυρά τοξική ένωση τόσο για τον άνθρωπο, όσο και για την υδρόβια ζωή. Από την εισπνοή ή την κατάποση αμμωνίας προκαλείται δηλητηρίαση, ενώ εάν έρθει σε επαφή με το δέρμα προκαλείται έγκαυμα. Δεδομένης της υψηλής τοξικότητας της αμμωνίας, θα πρέπει να θεσπιστούν κανονισμοί στη βιομηχανία και να ενημερωθούν τα πρωτόκολλα χρήσης της ως καυσίμου, πριν την ευρεία υιοθέτηση και χρήση της.

Καθώς η αμμωνία δεν περιέχει άνθρακα, η χρήση της ως καύσιμο πλοίων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου (*GHGs*).

Για την παραγωγή αμμωνίας χρησιμοποιείται η μέθοδος *Bosch-Haber*, κατά την οποία αντιδρούν υδρογόνο και άζωτο, σε αέρια κατάσταση, σε συνθήκες υψηλής πίεσης (100 bar) και θερμοκρασίας (400-500°C), παρουσία σιδήρου ως καταλύτη, κατά την εξώθερμη αντίδραση:



Πρώτες ύλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή αμμωνίας είναι το φυσικό αέριο, το βαρύ μαζούτ, ο άνθρακας και η νάφθα³. Από αυτές παράγεται με καταλυτική αναμόρφωση, αέριο μείγμα που περιέχει στοιχειακό υδρογόνο (H_2). Το μείγμα αερίων αναμειγνύεται με άζωτο (N_2) και συμπιέζεται μέσω ενός *turbo* συμπιεστή. Προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι ένα αέριο μείγμα που περιέχει σε μεγάλο ποσοστό άζωτο και υδρογόνο. Σε επόμενη φάση, παρουσία του καταλύτη σιδήρου και σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, παράγεται η αμμωνία. Το προϊόν συμπυκνώνεται και διαχωρίζεται, με σκοπό την εκ νέου αντίδραση υδρογόνου και αζώτου για την αύξηση της απόδοσης της διαδικασίας [55].

³ Η νάφθα αποτελεί ενδιάμεσο προϊόν διύλισης πετρελαίου, λαμβάνεται ως κλάσμα απόσταξης μεταξύ βενζίνης και κηροζίνης [55].

«Πράσινη» Αμμωνία

Η παραγωγή «πράσινης» αμμωνίας αποσκοπεί στην ενίσχυση της αειφόρου ανάπτυξης. Ως πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται νερό και αέρα, ενώ η ενέργεια, κυρίως η ηλεκτρική, που απαιτείται για την παραγωγή αμμωνίας καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές όπως ηλιακή, αιολική ή υδροηλεκτρική ενέργεια. Η μέθοδος παραγωγής «πράσινης» αμμωνίας έχει μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα [55].

«Μπλε» Αμμωνία

Η παραγωγή «μπλε» αμμωνίας χαρακτηρίζεται από τις χαμηλές εκπομπές αερίων άνθρακα, τα οποία όμως συλλέγονται και αποθηκεύονται με σκοπό την ανακύκλωση του άνθρακα μέσω κατάλληλων διαδικασιών [55].

Με την καύση της αμμωνίας παράγονται οξείδια του αζώτου (NO και NO_2), γνωστά ως NO_x , τα οποία συνεισφέρουν στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους, της όξινης βροχής και στη διάσπαση του όζοντος της στρατόσφαιρας. Παρόλα αυτά, οι παραγόμενες τιμές δεν ξεπερνούν τις τιμές που παράγονται από την καύση συμβατικών καυσίμων πλοίων.

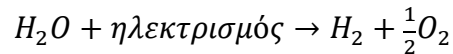
3.2.7. ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Το υδρογόνο ως καθαρό στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο από μόνο του. Βρίσκεται άφθονο στο περιβάλλον σε ενώσεις, και μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές όπως η βιομάζα, το νερό ή το φυσικό αέριο. Η σπουδαιότερη χρήση του καθαρού υδρογόνου ως ενεργειακή πηγή είναι η χρήση του σε κυψέλες καυσίμου [56]. Αν και το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), η κατανάλωση υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων σε στοιχεία (κυψέλες) καυσίμου είναι συνήθως περισσότερο αποτελεσματική.

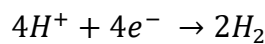
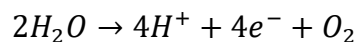
Για την παραγωγή υδρογόνου είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν υδρογονάνθρακες (ορυκτά καύσιμα ή φυσικό αέριο), άνθρακας, βιομάζα, αλλά και η ηλεκτρολυτική ή φωτο-ηλεκτρολυτική διάσπαση του νερού.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου από το νερό είναι [56]:

- Η ηλεκτρόλυση, η οποία είναι μια διαδικασία διάσπασης του νερού στα συστατικά του στοιχεία (υδρογόνο και οξυγόνο) με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας.



- Η φωτο-ηλεκτρόλυση, με χρήση της ενέργειας του ηλιακού φωτός που χρησιμοποιείται ώστε να διασπάσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε ειδική συσκευή στην οποία η διάσπαση του νερού επιτυγχάνεται με τη χρήση της ενέργειας του φωτός.
- Η φωτο-βιολογική παραγωγή, κατά την οποία η παραγωγή υδρογόνου προκύπτει από το συνδυασμό της φυσιολογικής διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, και την καταλυτική δράση ενζύμων που χαρακτηρίζονται ως υδρογονάσες⁴. Στη διαδικασία αυτή συμβαίνουν οι παρακάτω αντιδράσεις [56]:



- Η θερμοχημική διάσπαση του νερού, που πραγματοποιείται σε υψηλή θερμοκρασία, της τάξεως των 3000°C. Το 10% του νερού διασπάται στα επιμέρους συστατικά του και το υπόλοιπο 90% ανακυκλώνεται στο σύστημα.
- Η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα, η οποία, όπως έχει αναφερθεί, είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή άνθρακα, για παράδειγμα τη ξυλεία, τα υπολείμματα γεωργικών καρπών, και άλλα. Διακρίνονται τρεις τρόποι παραγωγής υδρογόνου από βιομάζα: οι άμεσες μέθοδοι παραγωγής (αεριοποίηση, πυρόλυση), οι έμμεσες μέθοδοι

⁴ Υδρογονάσες είναι ένζυμα που χρησιμοποιούνται από φυτά, όπως η πράσινη άλγη ή τα κυανοβακτήρια, κατά τη διάρκεια της φωτοσύνθεσης για τη διάσπαση του νερού.

(αναμόρφωση βιοκαυσίμων), και οι διαδικασίες διάσπασης μέσω της φωτοσύνθεσης και της χρήσης φωτο-βιολογικών οργανισμών [56].

Το υδρογόνο έχει χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου, οπότε απαιτείται υψηλή συμπίεση ώστε να χρησιμοποιηθεί επαρκής ποσότητα σε περιορισμένο όγκο. Για το λόγο αυτό, η χρήση αερίου υδρογόνου απαιτεί περίπου 1,9 φορές μεγαλύτερο αποθηκευτικό χώρο από ότι η αμμωνία και 3,3 φορές περισσότερο χώρο από την μεθανόλη [54], για να επιτευχθεί η αποθήκευση καυσίμου με το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο. Η ανάγκη συμπίεσης σε υψηλές πιέσεις προϋποθέτει την τήρηση αυστηρών κανονισμών ασφαλείας. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή υγροποιημένου υδρογόνου (LH_2) σε κρυογονικές δεξαμενές. Η απαιτούμενη ενέργεια για τη διατήρηση του υγροποιημένου υδρογόνου καταναλώνει περίπου το 30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η συνολική απόδοση του συστήματος [56]. Πλεονέκτημα της χρήσης υδρογόνου είναι το χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα, το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό της αμμωνίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (FUEL CELLS) ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

Τα στοιχεία καυσίμων, ή κυψέλες καυσίμων (*fuel cells*), είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν την χημική ενέργεια μιας αντίδρασης απευθείας σε ηλεκτρική. Μια κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρολύτη (υγρό ή στερεό) σε επαφή με ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται με αέρα προκειμένου να προκληθεί οξείδωση στο ανοδικό ηλεκτρόδιο και αναγωγή στο καθοδικό ηλεκτρόδιο και να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Οι διαφορετικοί τύποι των κυψελών καυσίμου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, με βάση τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται, ή με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας, ως εξής:

Κατηγοριοποίηση με βάση τον ηλεκτρολύτη:

- Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (*Alkaline Fuel Cell - AFC*).
- Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC*).
- Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικού άλατος (*Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC*).
- Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (*Solid Oxide Fuel Cell – SOFC*).
- Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (*Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC*).
- Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (*Direct Methanol Fuel Cell - DMFC*).

Κατηγοριοποίηση με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας:

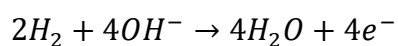
- Χαμηλής θερμοκρασίας (50-100°C)
- Ενδιάμεσης θερμοκρασίας (150-220°C)
- Υψηλής θερμοκρασίας (600-1000°C)

Στην τυπική δομή μιας κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνεται ο ηλεκτρολύτης, τα ηλεκτρόδια-καταλύτης, ένα στρώμα διάχυσης αερίων και οι πλάκες ροής (διπολικές πλάκες). Στα ηλεκτρόδια (ανόδου και καθόδου) γίνονται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των αντιδράσεων να οδηγούνται σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα ώστε να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.

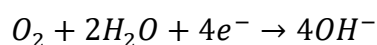
4.1. ΑΛΚΑΛΙΚΗ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (ALKALINE FUEL CELL - AFC)

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου είναι ένας από τους πρώτους τύπους κυψελών καυσίμου, γνωστός για την χρήση του στα διαστημικά προγράμματα της NASA, με σκοπό την παραγωγή νερού και ηλεκτρικής ενέργειας στο διαστημικό σκάφος. Η AFC καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο, παράγοντας ενέργεια και νερό. Οι βασικές αντιδράσεις που συμβαίνουν αναφέρονται παρακάτω:

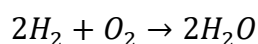
Στην άνοδο, το υδρογόνο οξειδώνεται από ιόντα υδροξειδίου. Από την αντίδραση παράγεται νερό και απελευθερώνονται ηλεκτρόνια:



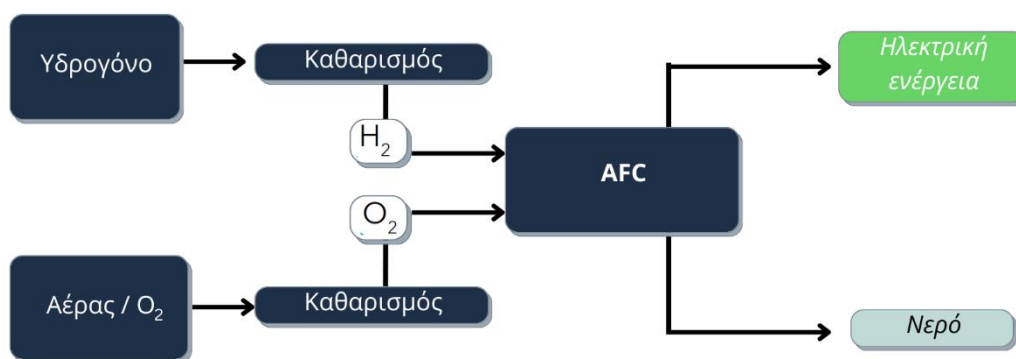
Στην κάθοδο, τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, και αντιδρούν με το νερό και το οξυγόνο που βρίσκονται μέσα στον ηλεκτρολύτη. Από την αντίδραση παράγονται ιόντα υδροξειδίου:



Η διαδικασία επαναλαμβάνονται καθώς τα ιόντα υδροξειδίου μετακινούνται εκ νέου στην άνοδο με σκοπό να αντιδράσουν ξανά με το υδρογόνο. Στη συνολική αντίδραση του συστήματος καταναλώνεται ένα μόριο οξυγόνου και δύο μόρια υδρογόνου και σχηματίζονται δύο μόρια νερού:



Από τη συνολική αντίδραση παράγονται ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα ως παραπροϊόντα. Στην Εικόνα 9 παριστάνεται διαγραμματικά η λειτουργία μιας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 9. Διαγραμματική αναπαράσταση λειτουργίας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου.

Βασικό μειονέκτημα της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου είναι η πιθανή απενεργοποίησή της (δηλητηρίαση) από την παρουσία αερίων όπως το μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα (CO, CO₂ αντίστοιχα). Η παρουσία του CO επηρεάζει τα ηλεκτρόδια υποβαθμίζοντας την καταλυτική τους ικανότητα, και το CO₂ αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη (KOH) για να παραχθούν ανθρακικά άλατα (K₂CO₃) που εμποδίζουν τη λειτουργία των ηλεκτροδίων και ως εκ τούτου τη λειτουργία της ίδιας της κυψέλης. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητος ο καθαρισμός (φιλτράρισμα) του αέρα, ενώ δεν προτείνεται η χρήση άλλου καυσίμου εκτός του υδρογόνου για την αλκαλική κυψέλη καυσίμου [57].

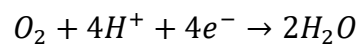
4.2. ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ (PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL - PEMFC)

Στην κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης μια πολυμερής μεμβράνη η οποία είναι αγωγός κατιόντων υδρογόνου (H⁺). Η διαφανής μεμβράνη κατασκευάζεται από συμπολυμερές σουλφονιωμένου τετραφθοροαιθυλενίου (εμπορική ονομασία *Nafion*), το οποίο μετατρέπεται σε αγωγό πρωτονίων με την κατάλληλη ποσότητα επιφανειακής υγρασίας. Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου έχει ως χαρακτηριστικά τη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, το χαμηλό βάρος και τη σχετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιτρέπει τη γρήγορη έναρξη λειτουργίας και ταυτόχρονα συμβάλλει στον περιορισμό της φθοράς των υλικών του συστήματος [57].

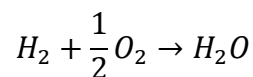
Κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το υδρογόνο εισάγεται στην άνοδο της κυψέλης και έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη, οπότε οξειδώνεται παράγοντας κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια σύμφωνα με την ημιαντίδραση:



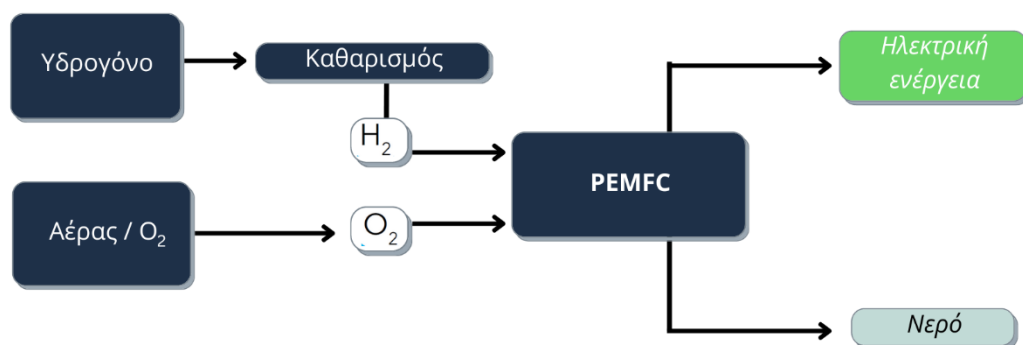
Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταφέρονται προς την κάθοδο του συστήματος μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος, οπότε παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Ταυτόχρονα στην κάθοδο παράγεται νερό από την αναγωγή του οξυγόνου, κατά την ημιαντίδραση:



Κατά τη συνολική αντίδραση καταναλώνεται ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου, σχηματίζοντας ένα μόριο νερού, με ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου και θερμότητας:



Στην Εικόνα 9 φαίνεται διαγραμματικά η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.



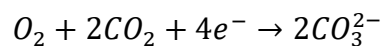
Εικόνα 10. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων.

4.3. ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΥ ΑΛΑΤΟΣ (MOLTEN CARBONATE FUEL CELL – MCFC)

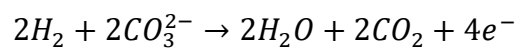
Κύριο χαρακτηριστικών των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFCs) είναι οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται τήγμα

ανθρακικού άλατος ενός αλκαλίου, που βρίσκεται τοποθετημένο σε κεραμική μήτρα. Οι κυψέλες αυτού του τύπου λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (600-700°C), στις οποίες το ανθρακικό άλας τήκεται και γίνεται αγωγός ανθρακικών ιόντων (CO_3^{2-}). Οι κυψέλες αυτού του τύπου δεν δηλητηριάζονται από μονοξείδιο ή διοξείδιο του άνθρακα, καθώς τα αέρια αυτά χρησιμοποιούνται ως καύσιμο [57]. Η λειτουργία της *MFCF* επιτυγχάνεται ως εξής:

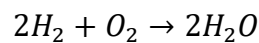
Στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα, παράγοντας CO_3^{2-} τα οποία τροφοδοτούν τον ηλεκτρολύτη:



Τα ανθρακικά ιόντα μεταφέρονται στην άνοδο, όπου αντιδρούν με υδρογόνο και παράγεται νερό και CO_2 :

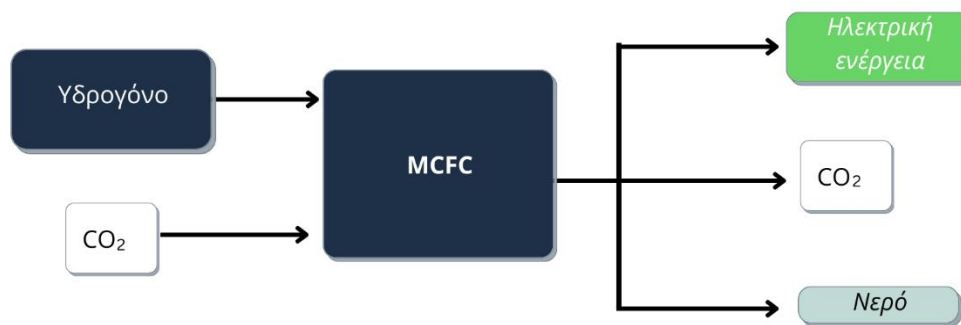


Τα παραγόμενα ηλεκτρόνια δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα καθώς οδηγούνται από την κάθοδο στην άνοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Η συνολική αντίδραση περιλαμβάνει την κατανάλωση υδρογόνου και οξυγόνου και το σχηματισμό νερού:



Από τη συνολική αντίδραση παράγονται νερό, ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα να ανακυκλώνεται μεταξύ ανόδου και καθόδου.

Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας παρέχουν την ευελιξία επιλογής *LNG* ή υδρογόνου ως καύσιμο λειτουργίας στις *MFCF*. Οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας αυτού του είδους κυψέλης επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση της πλεονάζουσας θερμότητας από άλλες συσκευές συνδεδεμένες με την κυψέλη. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου, ή φωσφορικού οξέος, όπως αναφέρεται παρακάτω (βλέπε παρ. 4.4 και 4.5). Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται μια διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου τήγματος ανθρακικού άλατος.

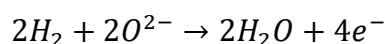


Εικόνα 11. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικού Άλατος.

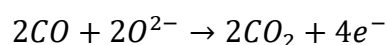
4.4. ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΞΕΙΔΙΟΥ (SOLID OXIDE FUEL CELL – SOFC)

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου ανήκει στην κατηγορία κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (800-1000 °C). Στις θερμοκρασίες αυτές δεν είναι απαραίτητη η παρουσία καταλύτη από πολύτιμα μέταλλα για την αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων. Επιπλέον, ο μετασχηματισμός του καυσίμου σε υδρογόνο γίνεται με αναμόρφωση στο εσωτερικό της κυψέλης, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη τοποθέτησης εξωτερικής μονάδας μετασχηματισμού [57].

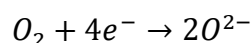
Οι ημιαντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην άνοδο της κυψέλης αφορούν το υδρογόνο (ανεξαρτήτως του καυσίμου που χρησιμοποιείται):



και το μονοξείδιο του άνθρακα όταν χρησιμοποιείται καύσιμο που περιέχει υδρογονάνθρακες:



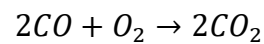
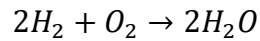
Στην κάθοδο γίνεται αναγωγή του μοριακού οξυγόνου:



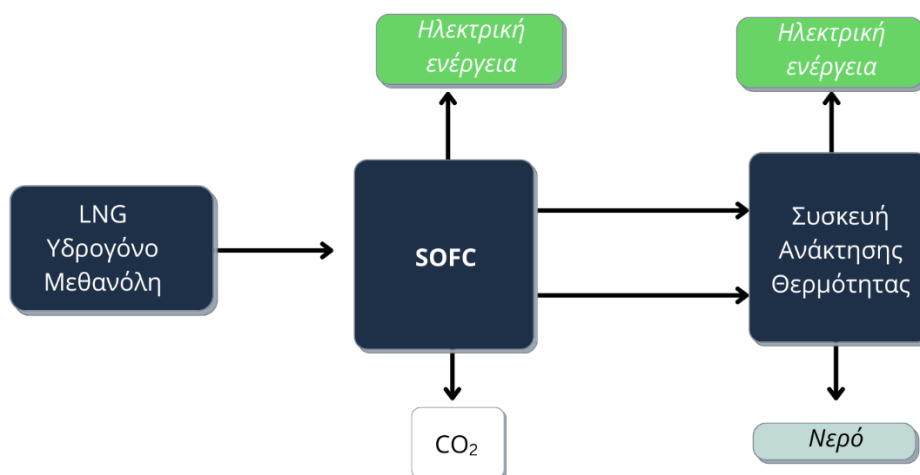
οπότε σχηματίζονται ιόντα O^{2-} τα οποία μετακινούνται μέσω αγωγίου ηλεκτρολύτη στην άνοδο. Στην άνοδο τα ιόντα οξυγόνου αντιδρούν με το υδρογόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα και παράγεται νερό και CO_2 . Παράγεται πλεονάζουσα θερμότητα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια με τη σειρά τους επιστρέφουν στην κάθοδο και παράγουν

ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με την παραγωγή εκ νέου ιόντων οξυγόνου στην κάθοδο από την αντίδραση των ηλεκτρονίων με το μοριακό οξυγόνο του αέρα.

Οι συνολικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην κυψέλη είναι οι εξής:



Για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος μπορεί να συνδεθεί συσκευή ανάκτησης της πλεονάζουσας θερμότητας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή επιπλέον ηλεκτρικής ενέργειας, και νερού. Στην Εικόνα 12 παρουσιάζεται διαγραμματικά η τυπική διάταξη της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου, με την επιπλέον τοποθέτηση συσκευή ανάκτησης της πλεονάζουσας θερμότητας για την απόδοση επιπλέον ηλεκτρικής ισχύος.

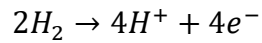


Εικόνα 12. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Στερεού Οξειδίου.

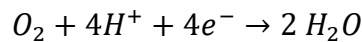
4.5. ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (PHOSFORIC ACID FUEL CELL – PAFC)

Στις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος χρησιμοποιείται ένα διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης φωσφορικού οξέος (H_3PO_4) το οποίο, ως ηλεκτρολύτης, είναι αγώγιμο λόγω των κατιόντων υδρογόνου (H^+). Το διάλυμα επιτρέπει τη λειτουργία της κυψέλης σε μεσαίας κλίμακας θερμοκρασίες (μέχρι $220^\circ C$) [57]. Η PAFC χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο (H_2) και οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο και την κάθοδο της κυψέλης παρουσιάζονται παρακάτω:

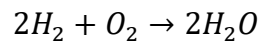
Στην άνοδο το υδρογόνο που τροφοδοτείται έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη και οξειδώνεται, παράγοντας κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια:



Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα καθώς μετακινούνται από την άνοδο στην κάθοδο. Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα υδρογόνου μετατρέπουν το οξυγόνο σε νερό:

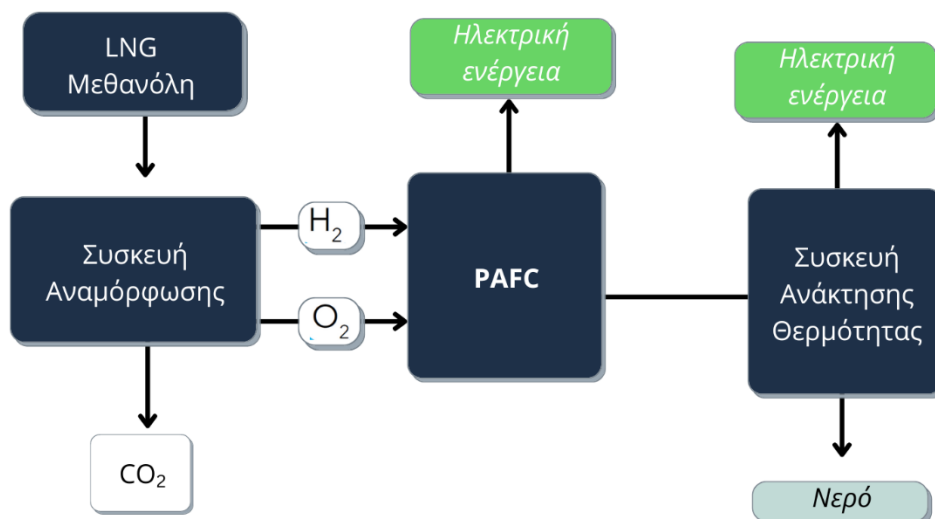


Η συνολική αντίδραση είναι:



Η παραγόμενη ισχύς αυτού του τύπου κυψελών είναι μικρότερη συγκριτικά με τους άλλους τύπους (37-42%) [57]. Ως μειονέκτημα θεωρείται το μεγάλο βάρος και μεγάλο μέγεθος των κυψελών αυτών. Για τη χρήση εναλλακτικών τύπων καυσίμου (όπως μεθανόλη ή LNG) αντί του υδρογόνου, απαιτείται εσωτερική αναμόρφωση του τροφοδοτούμενου καυσίμου για την παραγωγή υδρογόνου. Η διαδικασία αυτή αυξάνει το κόστος χρήσης κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος.

Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται διαγραμματικά η λειτουργία της κυψέλης.

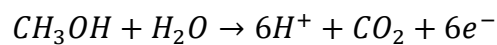


Εικόνα 13. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος.

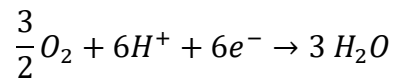
4.6. ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ (DIRECT METHANOL FUEL CELL - DMFC)

Σε αντίθεση με τα παραπάνω είδη κυψέλης καυσίμου, που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο είτε άμεσα είτε έπειτα από αναμόρφωση, στην κυψέλη καυσίμου μεθανόλης χρησιμοποιείται η μεθανόλη ως έχει, χωρίς να απαιτείται μετατροπή της σε υδρογόνο. Στις αντιδράσεις για την δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας η μεθανόλη έρχεται σε άμεση επαφή με τον ηλεκτρολύτη και οξειδώνεται, με αποτέλεσμα στη συνολική αντίδραση να καταναλώνεται μεθανόλη και να παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νερό [57].

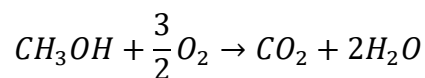
Άνοδος:



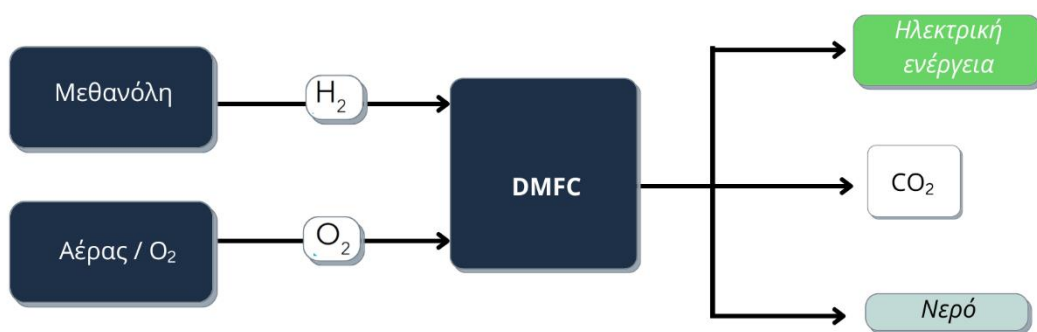
Κάθοδος:



Συνολική αντίδραση:



Από τη συνολική αντίδραση παράγονται ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται τυπική διαγραμματική διάταξη της λειτουργίας της κυψέλης.



Εικόνα 14. Διαγραμματική Αναπαράσταση Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου Μεθανόλης (DMFC).

Πλεονέκτημα της χρήσης κυψελών καυσίμου μεθανόλης είναι η άμεση χρήση της μεθανόλης χωρίς να απαιτείται αναμόρφωση.

4.7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Η εφαρμογή των κυψελών καυσίμου στην ναυτιλία ξεκίνησε το 1997 με το έργο *Ship Service Fuel Cell (SSFC)*. Στόχος ήταν η ανάπτυξη συστημάτων κυψελών καυσίμου σε πλοία του πολεμικού ναυτικού. Αρχικά σχεδιάστηκε ένα σύστημα κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικού άλατος (*MCFC*) των 2,5 MW και ένα σύστημα κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (*PEMFC*). Εμπόδια για την αποτελεσματική εφαρμογή της εγκατάστασης αποτέλεσαν η αργή εκκίνηση του συστήματος και η μεγάλη πολυπλοκότητα [58].

Το 2001 αναπτύχθηκε σύστημα αναμόρφωσης καυσίμου ντίζελ 25 KW, με την ονομασία «*DESIRE*», με σκοπό την εφαρμογή του στη ναυτιλία. Το σύστημα κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (*PEMFC*) συνδέθηκε με επιτυχία στο σύστημα αναμόρφωσης του καυσίμου ντίζελ. Παρόλα αυτά, παρουσιάστηκαν προβλήματα σχετικά με την αφαίρεση του θείου, την αστάθεια του φορτίου και την ανθεκτικότητα του συστήματος [59].

Ένα από τα πρωτοποριακά και μεγαλύτερα έργα χρήσης κυψελών καυσίμου στη ναυτιλία ήταν το έργο “*e4ships*”, που εφαρμόστηκε σε πλοία από το 2009 έως το 2016. Είναι το πρώτο έργο που κατάφερε να υποδείξει επιτυχημένες λύσεις για τη μείωση των εκπομπών ρύπων των πλοίων με τη χρήση τεχνολογιών κυψελών καυσίμου. Μια από τις επιτυχημένες εφαρμογές του ήταν το “*SchiBZ2*”, ένα σύστημα κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (*SOFC*) ισχύος 100 KW με σύστημα αναμόρφωσης ντίζελ, που εγκαταστάθηκε στο πλοίο «*MS Forester*» και λειτούργησε για 12 μήνες [60].

Ένα από τα νεότερα έργα είναι η κοινοπραξία μεταξύ των μελών της *FCHEA*, *Nel*, *Hexagon Composites* και *PowerCell Sweden*, που με την έγκριση του *DNV GL* θα προχωρήσουν στην ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου σε σύγχρονα πλοία. Τα μοντέλα προτείνουν συστήματα κυψελών καυσίμων βασιζόμενα σε διάταξη με ισχύ ανώτερη των 100 KW, που θα επιτρέπουν πλόες μεγάλης κλίμακας. Τα “*Project ZEFF*” και “*Project Seashuttle*”, αποτελούν τα δύο νέα έργα της *Hyon AS*, που έχουν στόχο τον μηδενισμό εκπομπών ρύπων με τη χρήση κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Η Νορβηγία υιοθέτησε

κανονισμούς που επιτρέπουν την λειτουργία των πλοίων των παραπάνω έργων στα ύδατα της, με στόχο την απαλλαγή από της εκπομπές ρύπων μέχρι το 2026 [56].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (EGCS)

Για τον άμεσο περιορισμό των αέριων ρύπων, η ναυτιλία έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη τεχνολογιών καθαρισμού των καυσαερίων των πλοίων, που παράγονται από τις τετράχρονες μηχανές των πλοίων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο, κυρίως, βαρύ πετρέλαιο (HFO) και ναυτιλιακό πετρέλαιο (MGO).

Τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (*Exhaust Gas Cleaning Systems - EGCS*), που είναι περισσότερο γνωστά ως *scrubbers*, είναι συστήματα ελέγχου των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων, τα οποία απομακρύνουν από τα καυσαέρια συγκεκριμένους ρύπους. Τα συστήματα αυτά, λειτουργούν ως «πληντρίδες», δηλαδή έχουν την δυνατότητα να «ξεπλένουν» τα καυσαέρια απομακρύνοντας κυρίως το διοξείδιο του θείου (SO_2) και άλλα όξινα αέρια που περιέχονται στα καυσαέρια. Τα τελευταία χρόνια, έχουν χρησιμοποιηθεί συστήματα *scrubber* τύπου ξηρού αντιδραστήρα ή τύπου χρήσης πολτού για την απομάκρυνση όξινων αερίων από καυσαέρια της μηχανής του πλοίου.

5.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (WET SCRUBBERS)

Τα συστήματα καθαρισμού υγρού τύπου (*wet scrubbers*) προωθούν τα καυσαέρια του πλοίου μέσα από υγρό προκειμένου να δεσμευτούν τα οξείδια του θείου (SO_x) από τα καυσαέρια, μέσω της χημικής αντίδρασης εξουδετέρωσης με το υγρό πλύσης. Τα πιο συνηθισμένα υγρά πλύσης που χρησιμοποιούνται είναι ακατέργαστο θαλασσινό νερό ή χημικά επεξεργασμένο φρέσκο νερό, ώστε να έχει αυξημένη αλκαλικότητα. Τα *scrubbers* θαλασσινού νερού συνήθως χαρακτηρίζονται ως διατάξεις ανοιχτού βρόγχου (*open loop*), στις οποίες το υγρό πλύσης αναρροφάται από τη θάλασσα ή από κάποια δεξαμενή και στο τέλος της διεργασίας διοχετεύεται σε δεξαμενή επεξεργασίας, ενώ τελικά επιστρέφει στη θάλασσα. Συνεπώς το χαρακτηριστικό αυτού του τύπου *scrubbers* είναι ότι το υγρό πλύσης που χρησιμοποιείται διοχετεύεται μία μόνον φορά μέσα από το σύστημα καθαρισμού, και στη συνέχεια διοχετεύεται ξανά στο περιβάλλον.

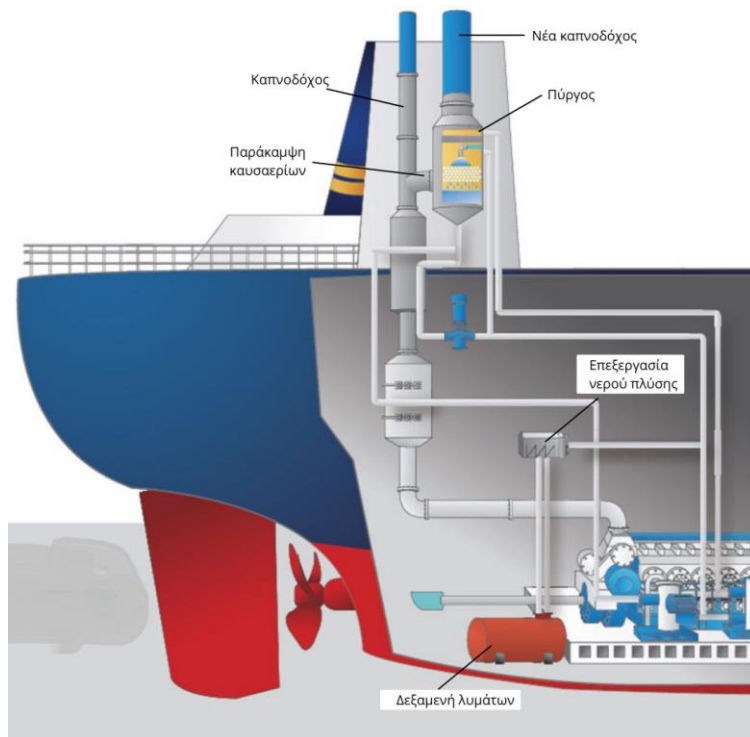
Σε ένα *scrubber* κλειστού βρόγχου (*closed loop*), το χρησιμοποιημένο υγρό πλύσης καθαρίζεται και στη συνέχεια ανακυκλώνεται και τροφοδοτεί ξανά το σύστημα σε έναν

επαναλαμβανόμενο κλειστό κύκλο. Στα συστήματα κλειστού τύπου το νερό επεξεργάζεται έτσι ώστε το pH του να διατηρείται σταθερό, και να είναι κατάλληλο για επαναχρησιμοποίηση.

Τα *wet scrubbers* αποτελούν μια απλή, αποτελεσματική τεχνολογία που έχει χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές στο παρελθόν για την απομάκρυνση των οξειδίων του θείου (SO_x). Μια τυπική διάταξη *wet scrubber*, για την απομάκρυνση των SO_x , αποτελείται από τα παρακάτω:

- Ένα βασικό πύργο *Scrubber*. Αυτό είναι ένα κλειστό δοχείο που περιλαμβάνει σε διάφορα ύψη σειρές από καταιονιστήρες από τους οποίους ψεκάζεται το υγρό πλύσης στα καυσαέρια. Ο πύργος με τους καταιονιστήρες συνήθως τοποθετείται ψηλά στη διάταξη του πλοίου, από την εσωτερική ή εξωτερική πλευρά της καπνοδόχου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 15.
- Ένα σύστημα επεξεργασίας του νερού πλύσης πριν την απόρριψή του στη θάλασσα.
- Ένα σύστημα επεξεργασίας υπολειμμάτων, ώστε αυτά να διαχωρίζονται από το νερό πλύσης.
- Ένα σύστημα ελέγχου (*control system*) του *scrubber* για την παρακολούθηση των εκπομπών αερίων.

Τα παραπάνω μέρη επικοινωνούν μέσω σωληνώσεων με διάφορες αντλίες, ψυγεία και δεξαμενές, ανάλογα με το σχεδιασμό του εκάστοτε συστήματος. Ένα σύστημα σωληνώσεων μπορεί να εξυπηρετεί περισσότερα από ένα συστήματα *scrubber* και είναι συνδεδεμένο με το σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης της διάταξης [61].

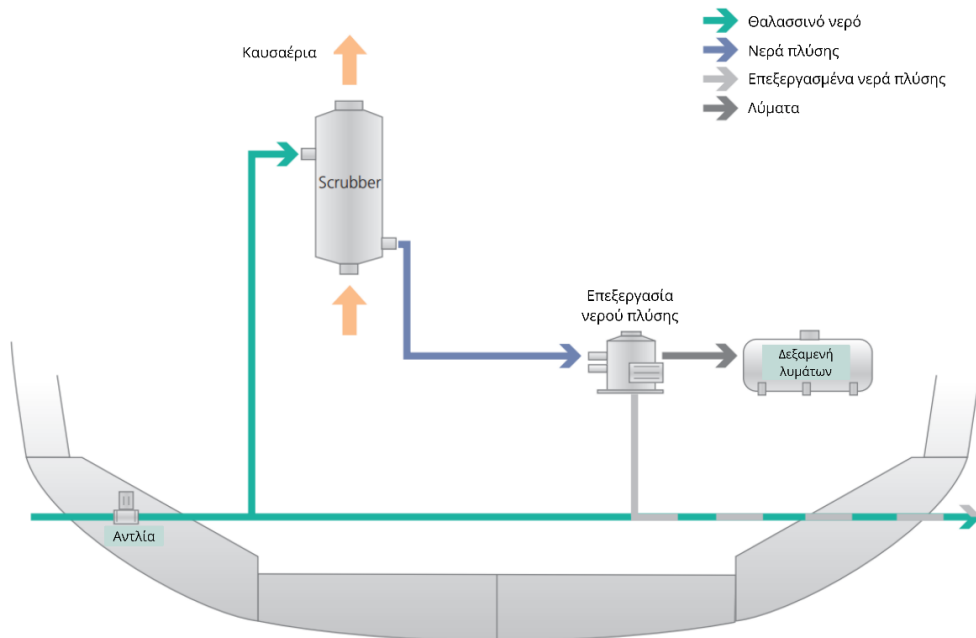


Εικόνα 15. Διάταξη συστήματος scrubber
(Πηγή: <https://www.naiaslabs.com/scrubber-water>)

5.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (OPEN LOOP WET SCRUBBERS)

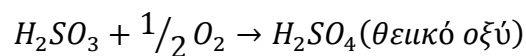
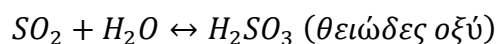
Τα ανοιχτού τύπου συστήματα υγρού καθαρισμού καυσαερίων χρησιμοποιούν το θαλασσινό νερό ως μέσο καθαρισμού των καυσαερίων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 16. Στα συστήματα αυτά συχνά χρησιμοποιείται θαλασσινό νερό, το οποίο αναμειγνύεται με τα καυσαέρια. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές ώστε να επιτευχθεί η ανάμειξη χωρίς να εμποδίζεται η πορεία των καυσαερίων, καθώς η παρεμπόδιση αυτή μπορεί να προκαλέσει αντίθλιψη (*backpressure*) εκτός των ορίων των προβλεπόμενων από τον κατασκευαστή της μηχανής, και να επηρεάσει την κατάσταση και την ομαλή λειτουργία της. Τα οξείδια του θείου στα καυσαέρια των πλοίων συναντώνται κυρίως με την μορφή διοξειδίου του θείου (SO_2), ενώ ένα μικρό ποσοστό εξ αυτών οξειδώνεται σε τριοξείδιο του θείου (SO_3) [62]. Κατά τη διάλυση τους στο θαλασσινό νερό προκαλείται χημική αντίδραση μετατροπής των οξειδίων του θείου σε θειώδη ή διθειώδη άλατα, τα οποία σε επόμενο στάδιο, με την επίδραση του οξυγόνου που

βρίσκεται διαλυμένο στο θαλασσινό νερό, οξειδώνονται για να παραχθούν θειικές ενώσεις. Το θαλασσινό νερό είναι ελαφρώς βασικό (αλκαλικό) με $pH=7,9$. Οι χημικές αντιδράσεις που γίνονται κατά τη λειτουργία ενός *scrubber* αναφέρονται ακολούθως.

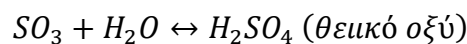


Εικόνα 16. Τυπική διάταξη του συστήματος καθαρισμού καυσαερίων υγρού τύπου ανοιχτού βρόγχου [62].

Για το διοξείδιο του θείου:



Για το τριοξείδιο του θείου:



Στα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων το νερό αναμειγνύεται με το καυσαέριο ανάλογα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου είναι αποδοτικά μόνο όταν το τροφοδοτούμενο νερό είναι αλκαλικό [61]. Παρ' όλα αυτά, κάποια νερά ποταμών, επειδή περιέχουν σημαντικές ποσότητες αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου,

χαρακτηρίζονται ως «σκληρά» και δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε συστήματα ανοιχτού βρόγχου. Η σκληρότητα και η αλκαλικότητα του νερού που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την κατασκευή των *scrubber*.

Το υγρό πλύσης μετά την διαδικασία καθαρισμού κατακρατείται σε μια υγρή ανοιχτή δεξαμενή στη βάση του πύργου του *scrubber*. Αυτό το νερό ονομάζεται νερό έκπλυσης (*washwater*) και αφαιρείται από τη διάταξη μέσω της βαρύτητας ή με μια αντλία. Στη συνέχεια μεταφέρεται σε διαχωριστή, ώστε να συλλεχθούν τα υλικά που περιέχουν τους ρύπους που κατακρατήθηκαν από τα καυσαέρια. Τα υλικά αυτά αποθηκεύονται στην ειδική δεξαμενή υπολειμμάτων του πλοίου. Στα υπολείμματα που συλλέγονται περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, αιωρούμενα μικροσωματίδια (*PM*), στάχτη, βαρέα μέταλλα και άλλες ουσίες που αποσπάστηκαν από το καύσιμο μαζί με αδιάλυτο θειικό ασβέστιο και αδιάλυτα στερεά που προϋπήρχαν στο νερό τροφοδοσίας [61]. Το πρόβλημα της υπολειμματικής λάσπης εμφανίζεται μόνο στα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων του τύπου ανοιχτού βρόγχου.

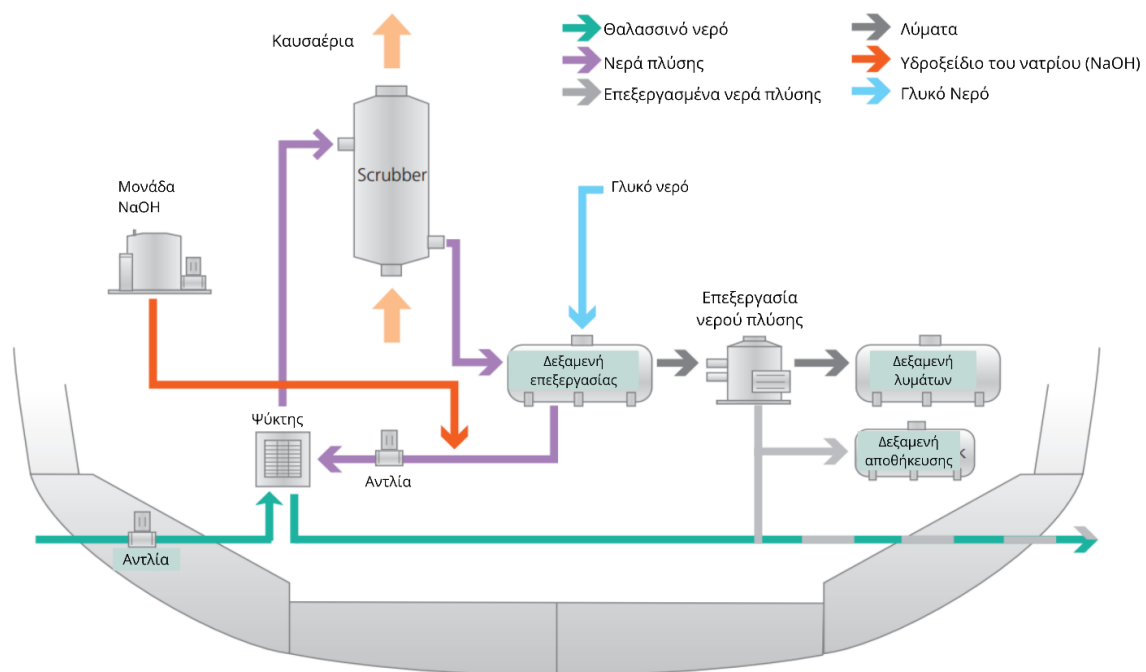
5.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (*CLOSED LOOP WET SCRUBBERS*)

Στα συστήματα καθαρισμού καυσαερίου κλειστού βρόγχου (*closed loop*), το επεξεργασμένο νερό ανακυκλώνεται στο *scrubber* ώστε η διαδικασία καθαρισμού να είναι ανεξάρτητη από τη χημική σύσταση του νερού μέσα στο οποίο πλέει το πλοίο, ενώ παράλληλα απορρίπτει ελάχιστη έως μηδενική ποσότητα νερού στη θάλασσα από τη διαδικασία καθαρισμού, μειώνοντας την ανάγκη για επεξεργασία του νερού έκπλυσης (*washwater*) ώστε να μπορεί να απορριφθεί στη θάλασσα χωρίς να ρυπαίνει.

Στα συστήματα κλειστού τύπου, η εσωτερική διάταξη είναι παρόμοια με αυτή των αντιστοίχων συστημάτων ανοιχτού τύπου και η χημική διαδικασία για την αφαίρεση των εκπομπών SO_x είναι η ίδια, όπως αναπτύχθηκε παραπάνω. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι ότι το νερό πλύσης αντί να απορρίπτεται επεξεργασμένο ξανά στη θάλασσα έπειτα από κάθε χρήση, στην περίπτωση του κλειστού τύπου, προωθείται για επεξεργασία μετά τη χρήση του και επεξεργάζεται κατάλληλα ώστε να ανατροφοδοτηθεί στον πύργο του συστήματος *scrubber*. Το νερό πλύσης μπορεί να είναι είτε φρέσκο, είτε αλμυρό νερό, ανάλογα με το σχεδιασμό του *EGCS*. Σε αυτή την διαδικασία επεξεργασίας, τα υπολείμματα

αφαιρούνται από το νερό, το οποίο στη συνέχεια εκτίθεται ξανά σε καυστική σόδα ($NaOH$) ώστε να διατηρείται η αλκαλικότητα του σε προκαθορισμένα επίπεδα [61].

Ένα *scrubber* κλειστού βρόγχου απαιτεί λιγότερη από τη μισή ποσότητα νερού έκπλυσης από ότι ένα σύστημα ανοιχτού βρόγχου, ώστε να έχει την ίδια απόδοση στον καθαρισμό των καυσαερίων. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι τα υψηλότερα επίπεδα αλκαλικότητας του νερού έκπλυσης, τα οποία ρυθμίζονται άμεσα στα συστήματα κλειστού βρόγχου με τη χρήση καυστικής σόδας ($NaOH$). Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη του υγρού συστήματος καθαρισμού καυσαερίων κλειστού βρόγχου [62].



Εικόνα 17. Τυπική διάταξη του υγρού συστήματος καθαρισμού καυσαερίων κλειστού βρόγχου [62].

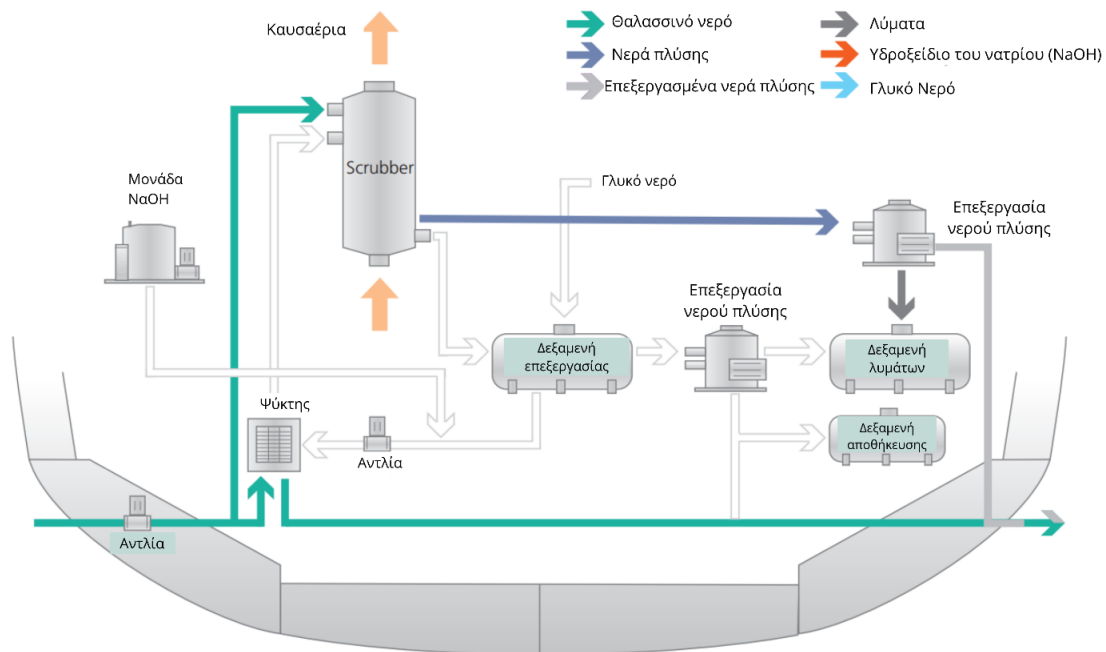
Σε ένα σύστημα *EGCS* κλειστού τύπου, τα νερά έκπλυσης που εξέρχονται από το *scrubber* προωθούνται σε δεξαμενή επεξεργασίας για ανακύκλωση. Μια ελάχιστη ποσότητα αυτών, από τον πυθμένα της δεξαμενής, όπου έχουν συλλεχθεί τα υπολείμματα, αναρροφάται και προωθείται σε διαχωριστή, παρόμοιο με αυτόν των ανοιχτού τύπου συστημάτων. Εκεί τα

υπολείμματα αφαιρούνται από το νερό, το οποίο στη συνέχεια διοχετεύεται εκ νέου στο *scrubber*.

5.4. ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (HYBRID WET SCRUBBERS)

Πλεονεκτήματα των συστημάτων υγρού καθαρισμού καυσαερίων ανοιχτού βρόγχου (*open loop wet scrubbers*), αποτελούν το ότι δεν απαιτείται χρήση καυστικής σόδας ($NaOH$) για τη κατεργασία των καυσαερίων, ενώ δεν απαιτείται επίσης επεξεργασία των νερών έκπλυσης μετά τη χρήση τους. Στα πλεονεκτήματα των συστημάτων υγρού καθαρισμού καυσαερίων κλειστού βρόγχου (*closed loop wet scrubbers*) περιλαμβάνεται το γεγονός ότι το *scrubber* έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί ανεξάρτητα από τη θέση του πλοίου κατά τον πλου, και παράλληλα απορρίπτει ελάχιστη ή μηδενική ποσότητα νερού στη θάλασσα, κάνοντας το την ιδανική επιλογή για παράκτιες περιοχές και λιμάνια.

Τα υβριδικά συστήματα υγρού καθαρισμού καυσαερίων (*hybrid wet scrubbers*) συνδυάζουν τα πλεονεκτημάτων των δύο παραπάνω τύπων συστημάτων. Τα υβριδικά *EGCS* λειτουργούν ως ανοιχτού βρόγχου *scrubbers* όταν το πλοίο είναι σε ανοιχτή θάλασσα, και ως κλειστού βρόγχου όταν το πλοίο επισκέπτεται περιοχές *ECA*. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται η τυπική διάταξη υβριδικού συστήματος καθαρισμού καυσαερίου ανοιχτού/κλειστού βρόγχου. Η λευκή διαγραμματική σύνδεση αντιστοιχεί στην αλλαγή της λειτουργίας από τύπο ανοιχτού βρόγχου (*open loop*) σε τύπο κλειστού βρόγχου (*closed loop*).

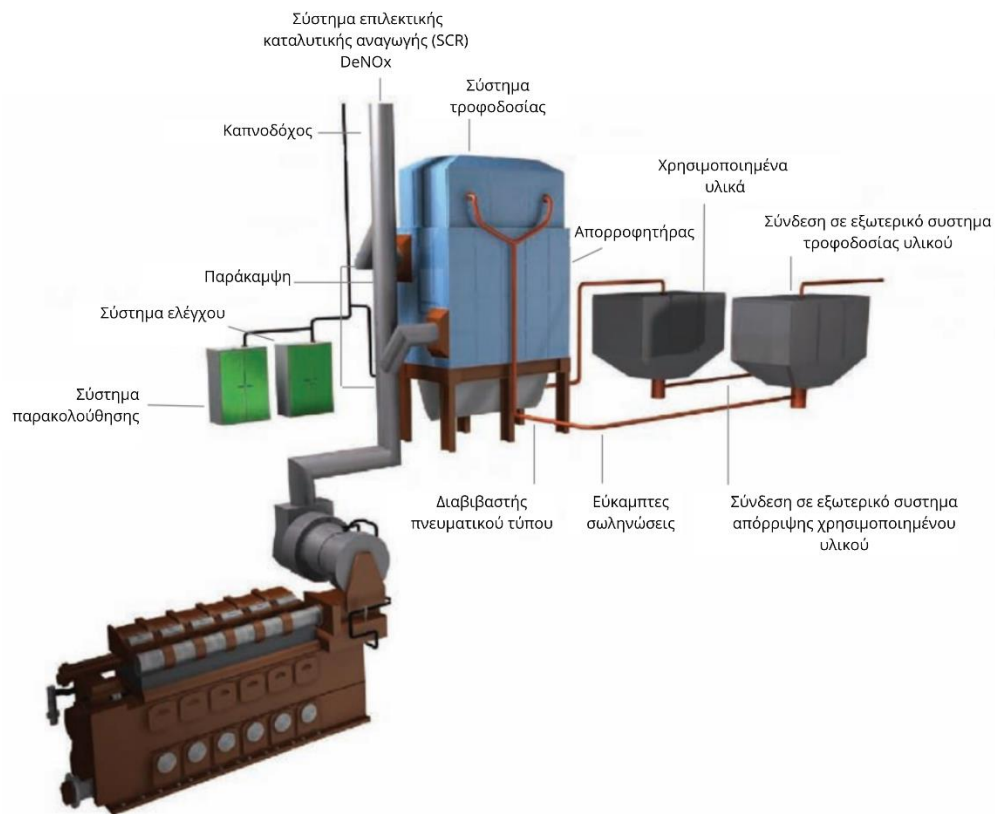


Εικόνα 18. Τυπική διάταξη υβριδικού συστήματος καθαρισμού καυσαερίων ανοιχτού και κλειστού βρόγχου [62].

5.5. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΞΗΡΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ (*DRY SCRUBBERS*)

Στα συστήματα ξηρού καθαρισμού (*dry scrubbers*) δε χρησιμοποιείται νερό ή άλλο υγρό έκπλυσης για τον καθαρισμό των καυσαερίων. Τα καυσαέρια έρχονται σε επαφή με στερεό υδροξείδιο του ασβεστίου ($Ca(OH)_2$), οπότε τα οξείδια του θείου αντιδρούν με αυτό παράγοντας θειικό ασβέστιο ($CaSO_4$). Εφόσον τα καυσαέρια δεν διέρχονται μέσα από υγρό και δεν ψύχονται, ένα σύστημα *dry scrubber* μπορεί να τοποθετηθεί πριν από τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας, όπως για παράδειγμα, τα *Exhaust Gas Economizers (EGE)* τα οποία τοποθετούνται στο περίβλημα της εξάτμισης άνω της κύριας μηχανής ή του λέβητα. Οι διατάξεις αυτές συνήθως απαιτούν θερμοκρασίες άνω των $350^{\circ}C$ για την ενεργοποίηση και τη λειτουργία των καταλυτών και τη δέσμευση των SO_x και NO_x . Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται

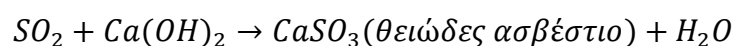
ένα τυπικό σύστημα ξηρού καθαρισμού καυσαερίων, τοποθετημένο στην εξάτμιση της κύριας μηχανής πλοίου.



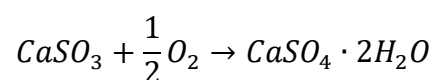
Εικόνα 19. Τυπική διάταξη συστήματος ξηρού καθαρισμού τοποθετημένο στην εξάτμιση κύριας μηχανής πλοίου [62].

Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα *dry scrubbers* αναφέρονται παρακάτω:

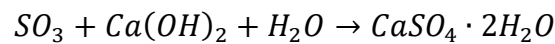
Για το διοξείδιο του θείου:



Το θειώδες ασβέστιο εν συνεχεία οξειδώνεται από τον αέρα και σχηματίζει ένυδρο θειικό ασβέστιο (γύψος):



Η αντίστοιχη αντίδραση για το τριοξείδιο του θείου είναι:



Το διπλό σύστημα *dry scrubber* χρησιμοποιεί στερεά σφαιρίδια (*pellet*) κόκκων ένυδρου υδροξειδίου του ασβεστίου μέσα στην κλίνη απορρόφησης. Το ένυδρο υδροξείδιο του ασβεστίου αντιδρά με τα θερμά καυσαέρια και απορροφά τα οξείδια του θείου (SO_x). Τα προϊόντα της αντίδρασης, περιέχουν θειικό ασβέστιο και στη συνέχεια απομακρύνονται από την κλίνη απορρόφησης και αποθηκεύονται στο πλοίο μέχρι την απόρριψη τους κατά τον ελλιμενισμό. Η μεταφορά των σφαιριδίων από και προς την κλίνη απορρόφησης επιτυγχάνεται με τη χρήση πνευματικών συστημάτων. Απαιτείται σύστημα παράκαμψης του συστήματος αυτού για τις περιόδους που το *scrubber* δεν είναι σε λειτουργία, όταν αυτή δεν απαιτείται.

Τα διπλά συστήματα ξηρού καθαρισμού καυσαερίων μειώνουν αποδοτικά τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) μέχρι 99%, και τα αιωρούμενα μικροσωματίδια *PM* σε ποσοστό περίπου 60% [61].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ , ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ & ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν αντικείμενο μεγάλου ενδιαφέροντος προκειμένου να χρησιμοποιηθούν μέσω «πράσινων» τεχνολογιών σε πολλούς τομείς. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν:

- Αιολικά συστήματα (*WASP*)
- Φωτοβολταϊκά συστήματα
- Συστήματα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας

καθώς και συνδυασμό των παραπάνω τεχνολογιών.

Οι «πράσινες» τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ΑΠΕ μπορούν να εφαρμοστούν στην κατασκευή νέων πλοίων, κατασκευασμένων έτσι ώστε να ενσωματώνουν συστήματα εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ή σε μετασκευές πλοίων που βρίσκονται σε λειτουργία. Η χρήση τέτοιων τεχνολογιών αναμένεται να συμβάλλει δραστικά στη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων.

6.1. ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΗΣ (*WIND-ASSISTED SHIP PROPULSION – WASP*)

Η αιολική ενέργεια θεωρείται ως μια ήπια μορφή ενέργειας, που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου, και ανήκει στις «καθαρές» πηγές ενέργειας, εκείνες δηλαδή που δε σχετίζονται με εκπομπές ρύπων. Η αιολική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικό βαθμό αποτελεσματικότητας από τα πλοία και εξαρτάται πλήρως από τις εκάστοτε καιρικές συνθήκες. Οι συνεχείς φυσικές διακυμάνσεις της ισχύος του ανέμου, καθώς και η δυσκολία στην αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού ιστιοφορίας κατά πλεύση αντίθετη της φοράς του αέρα είναι από τα βασικά μειονεκτήματα της. Η χρήση ιστίων σε σκάφη αναψυχής είναι ευρέως διαδεδομένη, σε αντίθεση με τα σύγχρονα ποντοπόρα πλοία. Στην εμπορική ναυτιλία η εφαρμογή συστημάτων αξιοποίησης αιολικής ενέργειας βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο, καθώς έχουν γίνει ορισμένες δοκιμαστικές προσπάθειες τοποθέτησης συστημάτων αιολικής πρόωσης ως βοηθητικό μέσο. Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας για

πρόωση απαιτεί τον συγκερασμό τεχνολογιών διαφορετικών τύπων, με στόχο την εφαρμογή σε όλους τους τύπους πλοίων, είτε ως κύριο, είτε ως βοηθητικό μέσο πρόωσης.

Αναφορικά με τον στόχο του *IMO 2050*, η αποκλειστική χρήση εναλλακτικών καυσίμων ίσως να μην επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα στη μείωση των ρύπων και την οικονομική απόσβεση. Οι ανεπτυγμένες και υπό ανάπτυξη τεχνολογίες *WASP* συνοψίζονται παρακάτω σε επτά βασικές κατηγορίες:

1. Μαλακά ιστία (*Soft sails*): Ο όρος αναφέρεται στα παραδοσιακά ιστία με μοντέρνα χαρακτηριστικά.
2. Σταθερά ιστία (*Rigid fixed sails, Wing sails, Foils*): Σταθερές επιφάνειες στο κατάστρωμα του πλοίου με την μορφή ιστίων, που μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να εκμεταλλεύονται τη δύναμη του αέρα για την πρόωση του πλοίου.
3. Ρότορες ή Κυλινδρικά ιστία: Κυλινδρικά ιστία που τοποθετούνται στο κατάστρωμα του πλοίου και παράγουν ώση μέσω του φαινομένου *Magnus*. Συχνά αναφέρονται και ως *Flettner rotors*, από τον δημιουργό τους, *Anton Flettner*.
4. Ειδικά ιστία τύπου αετού (*Kite Sails*): Ειδικά ιστία τύπου αετού που έλκουν το πλοίο με τη βοήθεια ανέμων μεγαλύτερου υψομέτρου, για βοηθητική πρόωση και μείωση κατανάλωσης καυσίμου.
5. Πτερύγια αναρρόφησης (*Suction Wings*): Τεχνολογία που βασίζεται επίσης στο φαινόμενο *Magnus*, πανομοιότυπη με αυτή των πτερυγίων των αεροσκαφών.
6. Ανεμογεννήτριες (*Wind Turbines*): Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν στο κατάστρωμα του πλοίου με σκοπό την παραγωγή ώσης ή ηλεκτρισμού που θα χρησιμοποιείται για την πρόωση του πλοίου.
7. Αεροτομές γάστρας (*Hull sails / Hull form*): Ειδικές αεροτομές που καθορίζονται κατά τον σχεδιασμό της γάστρας, με σκοπό την αεροδυναμική ανύψωση του πλοίου κατά την πλεύση.

Οι καιρικές συνθήκες είναι ασταθείς τόσο στον χρόνο (την ημέρα, την εποχή) όσο και στο χώρο (την πορεία του πλοίου). Ακόμα, οι υδροδυναμικές και αεροδυναμικές αλληλεπιδράσεις του πλοίου εν κινήσει θα πρέπει να μελετώνται προσεκτικά ώστε να είναι ωφέλιμες για την επίδοση του πλοίου. Για τους παραπάνω λόγους, η ανάλυση των αιολικών συστημάτων πρόωσης είναι μια σύνθετη διαδικασία.

Στις υφιστάμενες αναλύσεις έχουν προσδιοριστεί οι συνιστώσες που επηρεάζουν την απόδοση του πλοίου, αλλά έχουν απλοποιηθεί ορισμένα σημαντικά στοιχεία (για παράδειγμα, η λειτουργία του πλοίου), που μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην αποτελεσματικότητα της χρήσης αιολικών συστημάτων πρόωσης.

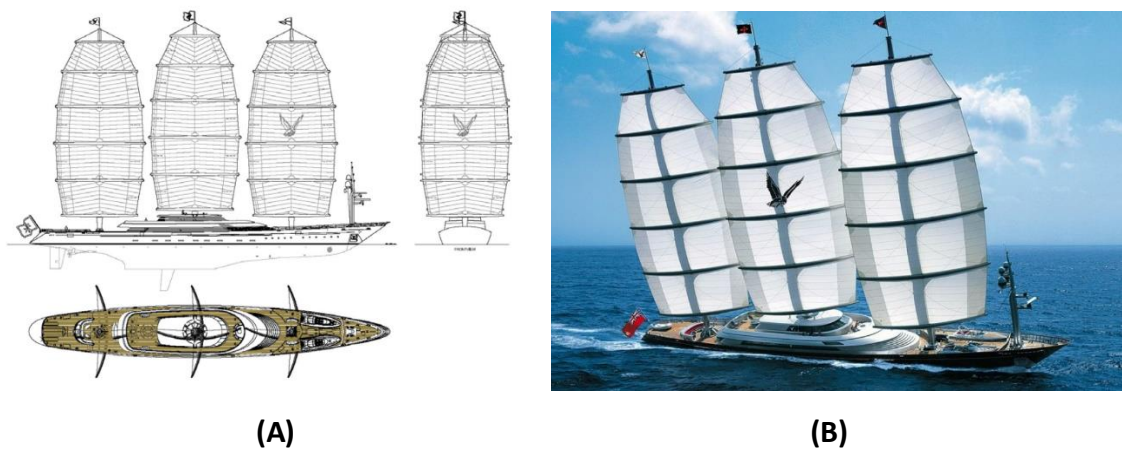
Η ανάλυση των αιολικών συστημάτων πρόωσης γίνεται σε τρία στάδια:

1. Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του πλοίου με αιολικό σύστημα πρόωσης (σχεδιασμός της γάστρας, εξοπλισμός) και της απόδοσης του πλοίου σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες (καιρός) και συνθήκες λειτουργίας (ταχύτητα, κατάσταση φόρτωσης).
2. Χαρακτηρισμός της απόδοσης του πλοίου με το αιολικού τύπου σύστημα πρόωσης κατά τον πλου, συνυπολογίζοντας τη μεταβλητότητα των καιρικών συνθηκών και τη λειτουργία του πλοίου κατά το ταξίδι.
3. Σύνοψη της απόδοσης του πλοίου από έναν αριθμό πλοίων, οικονομοτεχνική ανάλυση της λειτουργίας του πλοίου (αλληλεπίδραση μεταξύ ταχύτητας και εξοικονόμησης καυσίμου) και υπολογισμός απόδοσης της επένδυσης.

6.1.1. ΜΑΛΑΚΑ ΙΣΤΙΑ (*SOFT SAILS*)

Τα *soft sails* είναι ιστία κατασκευασμένα από ελαφρύ υλικό που έχει τη δυνατότητα να παραμορφώνεται, να τεντώνεται ή να κρεμιέται, ανάλογα με τις δυνάμεις που ασκεί ο άνεμος σε αυτό. Τέτοια ιστία χρησιμοποιούνται στα ιστιοφόρα σκάφη αναψυχής (ιστιοπλοϊκά). Στην εμπορική ναυτιλία χρησιμοποιήθηκαν μαλακά ιστία μέχρι το 1800.

Η χρήση μαλακών ιστίων σε σύγχρονα πλοία, με εναλλακτικές ανεπτυγμένες μορφές αναδεικνύεται μέσα από σύγχρονες μελέτες. Χαρακτηριστική είναι η μελέτη των *Dykstra Naval Architects* που χρησιμοποίησαν τη νέα τεχνολογία μαλακών ιστίων *DynaRig*, δοκιμαστικά στη θαλαμηγό *Maltese Falcon* (2006) [63]. Σύμφωνα με την αναφορά των *Dykstra Naval Architects* [64], το σύστημα *DynaRig* συστήθηκε από τον Wilhelm Pröls και η δοκιμή τοποθέτησης του σε θαλαμηγό ξεκίνησε το 2000. Οι ιστοί (κατάρτια) είναι τοποθετημένοι κατακόρυφα και διαθέτουν ελευθερία περιστροφής, οι μάτσες (οριζόντια μέρη που συγκρατούν τα ιστία-πανιά) είναι κυρτές και σταθερά προσαρμοσμένες στους κατακόρυφους ιστούς. Τα πανιά ξετυλίγονται ξεχωριστά με τη χρήση αυτοματισμού, και στην πλήρη έκτασή τους δεν αφήνουν κενά ανάμεσα τους, έτσι ώστε να λειτουργούν σαν ένα ενιαίο ιστίο. Το συνολικό σύστημα ιστού και πανιών έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται ώστε να τοποθετείται με την κατάλληλη κλίση στις δυνάμεις του ανέμου και να εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή πρόωση κατά την πλεύση. Στην Εικόνα 20Α φαίνεται ο σχεδιασμός του συστήματος μαλακών ιστίων *DynaRig*, και στην Εικόνα 20B δίνεται φωτογραφία από τη θαλαμηγό *Maltese Falcon* (2006).



Εικόνα 20. Σχέδιο συστήματος μαλακών ιστίων *DynaRig* (A) και εικόνα της θαλαμηγού *Maltese Falcon* (2006) (B) (Πηγή: <https://imperialeseamarine.com/the-maltese-falcon/>).

6.1.2. ΣΤΑΘΕΡΑ ΙΣΤΙΑ (FIXED SAILS)

Η τεχνολογία των σταθερών ιστίων περιλαμβάνει ένα σύστημα σταθερών ή αναδιπλούμενων ιστίων που έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τη διαγωγή τους σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του πνέοντος ανέμου, ώστε να συνεισφέρουν στην πρόωση

του πλοίου. Στην Ιαπωνία, από την κλάση *NKK* και την *Japanese Marine Machinery Development Association (JAMDA)* δημιουργήθηκαν τα πρώτα σταθερά, αναδιπλούμενα ιστία ως βοηθητικός μηχανισμός πρόωσης (Εικόνα 21). Τα σταθερά ιστία διέθεταν κατάλληλο αυτοματισμό ώστε να προσαρμόζουν την διαγωγή τους με βάση τον πνέοντα άνεμο.



(A)

(B)

Εικόνα 21. Σχέδια πλοίου μεταφοράς οχημάτων *Orcelle Wind* με αναδιπλούμενα σταθερά ιστία (A) (Πηγή: *Wallenius Wilhelmsen ASA*) και τοποθέτησης σταθερών ιστίων (fixed sails) σε φορτηγό (B) (Πηγή: <https://www.ship-technology.com/news/drax-forms-new-partnership/>).

6.1.3. ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΙΣΤΙΑ (*FLETTNER ROTORS*)

Τα *Rotor Sails*, γνωστά και ως «*Flettner Rotors*», είναι μεγάλα κατακόρυφα κυλινδρικά ιστία που τοποθετούνται στο πλοίο και περιστρέφονται δημιουργώντας βοηθητική πρόωση στο πλοίο εκμεταλλευόμενα το φαινόμενο *Magnus*. Το φαινόμενο *Magnus* ανακαλύφθηκε από τον *Heinrich Gustav Magnus*, ο οποίος το 1851 περιέγραψε μια επιπρόσθετη πλευρική δύναμη που δημιουργείται όταν ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο τοποθετείται σε ροή αέρα (ή γενικά ρευστού) [65]. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό από πολλά αθλήματα στα οποία προσδίδονται στροφές στην μπάλα με αποτέλεσμα να ακολουθεί μια καμπύλη τροχιά καθώς κινείται στον αέρα.

Το 1922 ο *Anton Flettner* προχώρησε στη δημιουργία του ρότορα *Flettner* που χρησιμοποιεί το φαινόμενο *Magnus*. Τα περιστρεφόμενα κυλινδρικά ιστία *flettner* παράγουν βοηθητική ισχύ πρόωσης, η οποία εκμεταλλεύεται την αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα τη μείωση κατανάλωσης καυσίμου. Ταυτόχρονα συνεισφέρουν και στον περιορισμό των σχετικών εκπομπών αέριων ρύπων κατά ένα ποσοστό της τάξης του 7-10% [66].

Η εταιρεία *Norsepower Oy Ltd* σε συνεργασία με τη *Maersk Tankers*, το *Energy Technologies Institute (ETI)* και τη *Shell Shipping and Maritime*, προχώρησαν το 2018 στην τοποθέτηση δύο *Norsepower Rotor Sails* στο δεξαμενόπλοιο της εταιρείας *Maersk Tankers*, *Maersk Pelican*, παρουσιάζοντας τη φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογική καινοτομία των *Rotor Sails*. Τα ιστία αυτά με ύψος 30 m και διάμετρο 5 m, ήδη έχουν δοκιμαστεί στην ξηρά και αποτέλεσαν τα πρώτα *Rotor Sails*, που έλαβαν έγκριση από νηογνώμονα για την τοποθέτηση τους σε *product tanker*, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 22** [66].

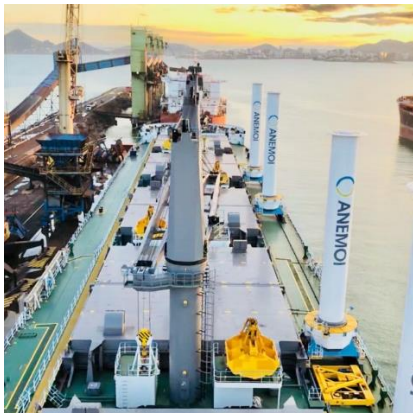


Εικόνα 22. *E-ship1* (A), και *Maersk Pelican* με εγκατεστημένους ρότορες (B) [66].

Παρόμοια τεχνολογία κυλινδρικών ιστίων έχει εγκαταστήσει η ελληνικών συμφερόντων ναυτιλιακή εταιρεία *Blue Planet Shipping*, σε συνεργασία με την εταιρεία *Anemoi Marine Technologies*, στο *bulk carrier* «*M/V AFROS*». Το 2018 εγκαταστάθηκαν στο «*M/V AFROS*» τέσσερις ρότορες διαμέτρου 2 m και ύψους 16 m (**Εικόνα 23**). Σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρείας *Anemoi Marine Technologies* [67], με βάση τις συνθήκες ανέμου που έπνεαν από τον Νοέμβριο του 2019 έως τον Ιανουάριο του 2020 κατά τον προγραμματισμένο πλου από το Ναντόνγκ της Κίνας στο Βανκούβερ του Καναδά και αντιστρόφως, υπολογίζεται πως εξοικονομήθηκαν 73 τόνοι καυσίμου. Η εξοικονόμηση καυσίμου που επιτεύχθηκε αντιστοιχεί σε μείωση ρύπων κατά 12,5%, που ισοδυναμεί με 235 τόνους CO₂.

Αντίστοιχη εγκατάσταση κυλινδρικών περιστρεφόμενων ιστίων από την *Anemoi Marine Technologies* έγινε το 2022 στο *Kamsarmax* φορτηγό πλοίο «*TR Lady*» χωρητικότητας 82.000 DWT της εταιρείας *TR Lady Shipping Ltd*. Η εγκατάσταση περιλαμβάνει τρία *Rotor Sails* και το καινοτόμο *Rail Deployment System* της *Anemoi* [68]. Το *Rail Deployment System* (**Εικόνα 23**)

επιτρέπει στα *Rotor Sails* του πλοίου να μετακινούνται πάνω στο κατάστρωμα, προκειμένου να επηρεάζονται κατ' ελάχιστο οι λειτουργίες του πλοίου στα λιμάνια [69].



(A)



(B)

Εικόνα 23. Το φορτηγό πλοίο "AFROS" με εγκατεστημένους ρότορες [67] (A), και το σύστημα *Rail Deployment* της *Anemoi Marine Technologies* [69] (B).

6.1.4. ΕΙΔΙΚΑ ΙΣΤΙΑ ΤΥΠΟΥ ΑΕΤΟΥ

Τα ειδικά ιστία *kite sails* εμφανίστηκαν κατά την περίοδο της πετρελαϊκής κρίσης του 1980 [70]. Συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες αιολικής πρόωσης, τα ειδικά ιστία *kite sails* έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Δέχονται την επίδραση ανέμου μεγαλύτερης ταχύτητας, καθώς λειτουργούν σε μεγαλύτερο ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Αναπτύσσονται δυναμικά, οπότε δεν απαιτείται μεγάλος χώρος για την αποθήκευσή τους στο κατάστρωμα του πλοίου.
- Καθώς αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις στο πρωραίο τμήμα του πλοίου, προκαλείται ελαφρά κλίση με ανύψωση της πλώρης, που επιφέρει μια μικρή μείωση της αντίστασης του πλοίου στη θάλασσα.

Το 2008 η εταιρεία *Skysails* προχώρησε σε εφαρμογή της ομώνυμης τεχνολογίας στο φορτηγό πλοίο «*MS BELUGA SKYSAILS*». Στην Εικόνα 24 αναπαρίστανται οι διαδοχικές φάσεις ανάπτυξης του συστήματος *SkySails*.



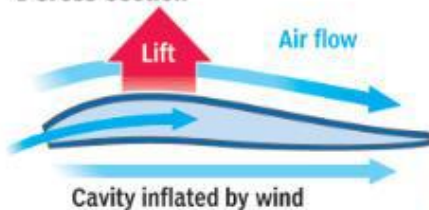
Εικόνα 24. Διαδοχικές φάσεις ανάπτυξης ιστίου τύπου αετού (*Kite Sails*)
(Πηγή: https://skysails-group.com/wp-content/uploads/2022/01/SkySailsMarine_Brochure_EN_web.pdf)

Το πλοίο «*MS BELUGA SKYSAILS*» μήκους 132 m έπλευσε από τη Βρέμη της Γερμανίας με προορισμό τη Βενεζουέλα, χρησιμοποιώντας το ειδικό ιστίο τύπου αετού «*Skysails*». Ο αετός έχει επιφάνεια 160 m², με δυνατότητα επέκτασης της επιφάνειας του έως και 5000 m². Κατά την λειτουργία του ο αετός βρίσκεται σε ύψος άνω των 250 m πάνω από το πλοίο, προσδεμένος στην πλώρη του πλοίου με καλώδιο ρυμούλκησης. Το καλώδιο έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει ηλεκτρονικές πληροφορίες σε υπολογιστή πάνω στο πλοίο, με σκοπό την προσαρμογή του αετού για την βέλτιστη ρυμούλκηση του πλοίου. Στην **Εικόνα 25** παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του ειδικού ιστίου τύπου αετού «*Skysails*».

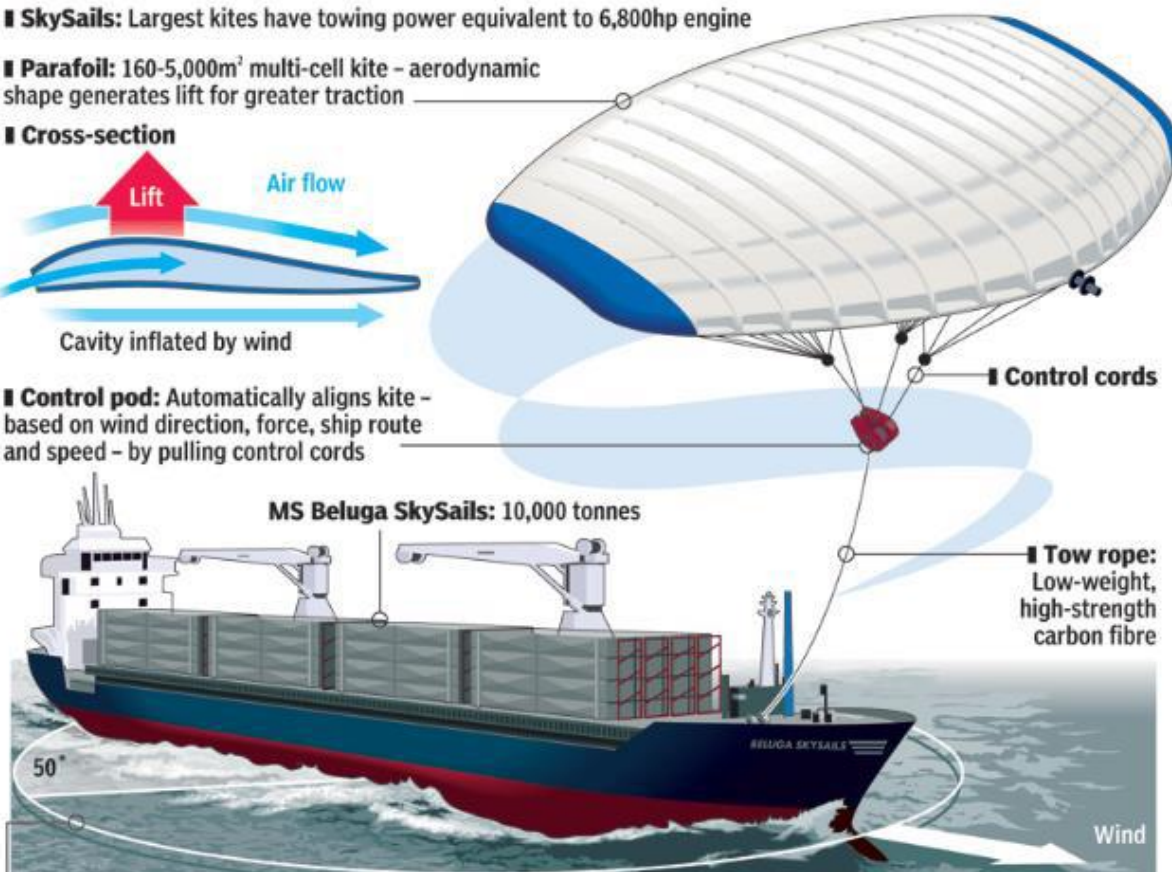
■ **SkySails:** Largest kites have towing power equivalent to 6,800hp engine

■ **Parafoil:** 160-5,000m² multi-cell kite – aerodynamic shape generates lift for greater traction

■ **Cross-section**

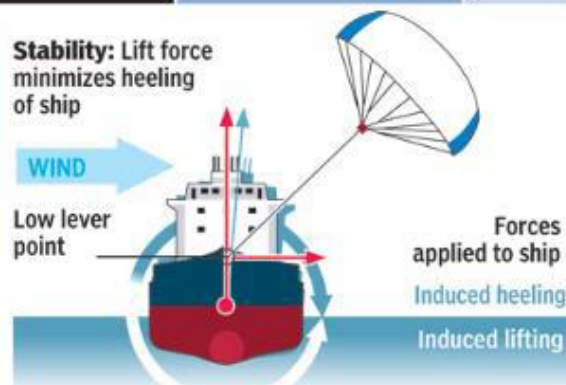
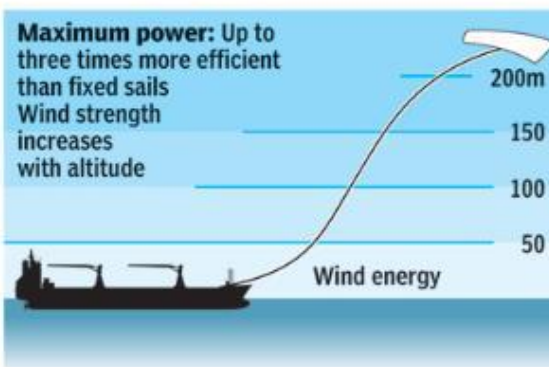


■ **Control pod:** Automatically aligns kite – based on wind direction, force, ship route and speed – by pulling control cords



■ **Sailing direction:** SkySail can be used to sail at up to 50° against wind

SkySail saving 10-35%



SOURCES: SKYSAILS, BELUGA GROUP, WINTECC PROJECT

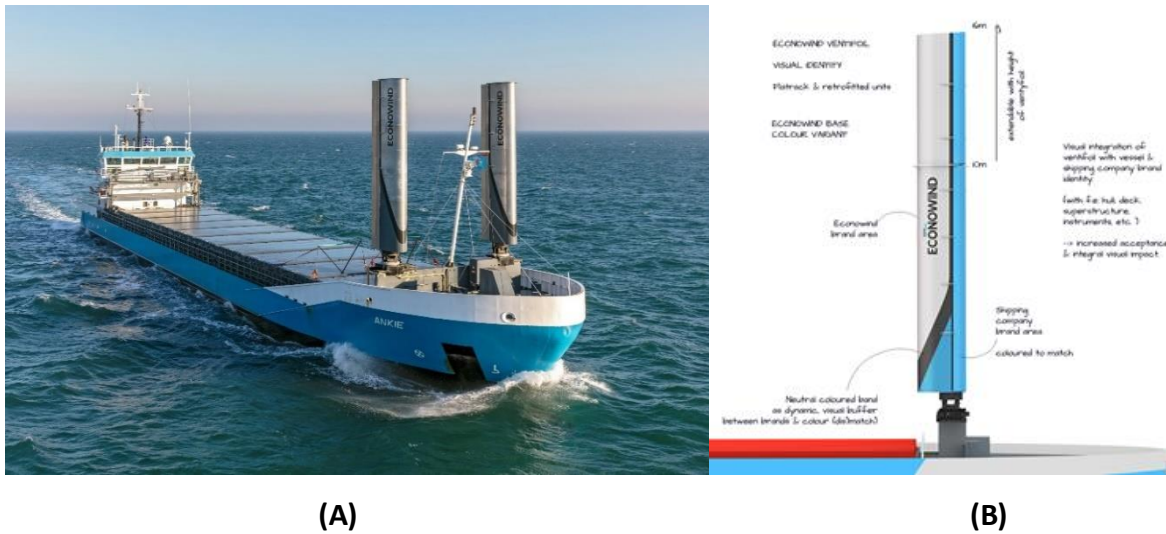
GRAPHIC NEWS / NATIONAL POST

Εικόνα 25. Περιγραφή λειτουργίας του συστήματος SkySails στο πλοίο «MS Beluga SkySails» (Πηγή: <https://gcaptain.com/ocean-kites-top-10-green-ship-designs/>)

6.1.5. ΠΤΕΡΥΓΕΣ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ (*SUCTION WINGS*)

Οι πτέρυγες αναρρόφησης δημιουργούν μια ανυψωτική ελκτική δύναμη παρόμοια με αυτή των πτερυγίων των αεροσκαφών. Η εταιρεία *eConowind* έχει προχωρήσει στην ανάπτυξη των συστημάτων *Ventfoil* και *eConowind*. Αυτά αποτελούνται από σταθερές αεροδυναμικές πτέρυγες που διαθέτουν αεραγωγούς και εσωτερικές πτερωτές ώστε να δημιουργούν αναρροφητικές δυνάμεις [71]. Κάθε πτέρυγα έχει τη δυνατότητα να τοποθετηθεί σε υπάρχον πλοίο έπειτα από έρευνα εγκατάστασης, συνεισφέροντας στην πρόωση του πλοίου. Τα *suction wings* μπορούν να περιστρέφονται αυτόματα ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη γωνία σχετικά με την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Η παραγόμενη ισχύς μεταφέρεται αυτομάτως στο κατάστρωμα του πλοίου, οπότε οι τοποθετημένες πτέρυγες λειτουργούν συνεργατικά στην πρόωση του πλοίου. Ως εκ τούτου, για τη διατήρηση της βέλτιστης ταχύτητας του πλοίου, η μηχανική ισχύς περιορίζεται. Σε ακατάλληλες καιρικές συνθήκες, το σύστημα έχει τη δυνατότητα να διπλωθεί και να παραμείνει κλειδωμένο στη βάση της εγκατάστασης του. Όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός, όπως τα υδραυλικά, οι αυτοματισμοί, και τα συστήματα εξαερισμού βρίσκονται ενσωματωμένα στη βάση της εγκατάστασης του συστήματος. Για τη λειτουργία του συστήματος απαιτείται μόνο ηλεκτρική τροφοδοσία από το πλοίο, με τα εξής χαρακτηριστικά: τάση 400-460 V, τριών φάσεων και συχνότητα λειτουργίας 50-60 Hz [71].

Η πρώτη τοποθέτηση του συστήματος έγινε το 2019 στο πλοίο γενικού φορτίου *M/V Ankie* με 3.600 DWT στην Ολλανδία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 26Α.



Εικόνα 26: Το πλοίο γενικού φορτίου *M/V Ankie* με σύστημα πτερύγων αναρρόφησης **(A)** και η πτέρυγα *eConowind* **(B)** [71].

6.1.6. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ (*WIND TURBINES*)

Η εφαρμογή της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών στην εμπορική ναυτιλία αποτελεί καινοτομία που βρίσκεται σε στάδιο μελέτης από διάφορα πανεπιστήμια, όπως το πανεπιστήμιο *TU Delft* [72]. Απ' όσα είναι γνωστά μέχρι τώρα, η τεχνολογία αυτή δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα σε κάποιο εμπορικό πλοίο για την παροχή βοηθητικής πρόωσης. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμη εναλλακτική πηγή ενέργειας για τη ναυτιλία, καθώς έχουν τη δυνατότητα να τροφοδοτήσουν ενεργειακά το πλοίο με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας,
- Με την παροχή βοηθητικής πρόωσης.

Η ενέργεια που παρέχει η ανεμογεννήτρια προέρχονται από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, γεγονός που καθιστά την τεχνολογία αυτή αειφόρο και βιώσιμη. Η εφαρμογή της τεχνολογίας θα πρέπει να μελετηθεί προσεκτικά (π.χ. μελέτη δρομολογίων και της πορείας του πλοίου) έτσι ώστε να βελτιώνεται η αποδοτικότητα του πλοίου και να μειώνεται το αποτύπωμα άνθρακα. Για την εφαρμογή σε εμπορικό πλοίο, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράγοντες όπως οι δεξιότητες του πληρώματος για τον χειρισμό της νέας τεχνολογίας και την

συντήρηση του εξοπλισμού της, το οικονομικό κόστος, η βέλτιστη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας κλπ.

Το κυριότερο πρόβλημα που προκύπτει με την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο πλοίο είναι το γεγονός ότι η πρόωση που δημιουργείται έχει θετικό πρόσημο όταν είναι σύμφωνη με την κατεύθυνση του πλοίου, αλλά αρνητική τιμή όταν η πορεία του πλοίου βρίσκεται σε αντίθεση με τη διεύθυνση του ανέμου. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει να εξετάζεται το όφελος της βοηθητικής πρόωσης που μπορεί να παράγει η ανεμογεννήτρια, αλλά και η ανάκληση που προσδίδει η αρνητική πρόωση σε κάποιες περιπτώσεις κατά τον πλου.

Στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας συμπεριλαμβάνονται το μεγάλο μέγεθος της γεννήτριας, το μικρό ποσοστό παραγόμενης ενέργειας που μπορεί να συλλεχθεί, όπως και η δυσκολία στην αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας στο πλοίο. Οι υφιστάμενες μελέτες για τη χρήση των ανεμογεννητριών στα πλοία εστιάζουν περισσότερο στη χρήση των ελίκων (προπελών) ως μέσων παραγωγής ενέργειας [73], δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες απαιτούν μεγάλη ταχύτητα ανέμου για να συνεισφέρουν ουσιαστικά στην πρόωση του πλοίου. Έχει υπολογιστεί ότι οι ανεμογεννήτριες (*wind turbines*) μπορούν να αποδίδουν μεγαλύτερη πρόωση σε σύγκριση με τα σταθερά ιστία (*wing sails*), μόνο όταν η ταχύτητα του πλοίου είναι μικρότερη από το μισό της ταχύτητα του ανέμου [74]. Αυτό συνεπάγεται ότι για να θεωρηθούν οι ανεμογεννήτριες ως προτιμώμενο μέσο αξιοποίησης αιολικής ενέργειας για την πρόωση του πλοίου που θέλει να αναπτύξει ταχύτητα ίση με 15 κόμβους, θα πρέπει να ταξιδέψει σε δύσκολες καιρικές συνθήκες με ανέμους άνω των 15 m/s (6-7 μποφόρ και ύψος κυμάτων 4-5,5 m) [75]. Εναλλακτική λύση είναι η μείωση της ταχύτητας του πλοίου, μέτρο που αυτομάτως μειώνει και την κατανάλωση καυσίμου.

Το ύψος άνω της ισάλου γραμμής είναι περιοριστικός παράγοντας τόσο για την τοποθέτηση ανεμογεννητριών όσο και για την εγκατάσταση μαλακών ή σταθερών ιστίων. Οι γέφυρες στα μεγαλύτερα λιμάνια του κόσμου έχουν περιορισμό ως προς το ύψος αιολικών συστημάτων πρόωσης μέχρι περίπου 60 m, εκτός εάν η ανεμογεννήτρια ή τα ιστία μπορούν να αναδιπλώνονται [75]. Αυτό σημαίνει πως σε ένα πλοίο με σύστημα ανεμογεννήτριας για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, το μεγαλύτερο μη-αναδιπλούμενο μέρος του συστήματος

θα πρέπει να είναι γύρω στα 40 m, λαμβάνοντας υπόψη και το ασφαλές ύψος που θα πρέπει να έχουν οι πτέρυγες από το κατάστρωμα.

6.1.7. ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ ΓΑΣΤΡΑΣ (HULL SAILS/HULL FORM)

Νέα καινοτομία στο σχεδιασμό της γάστρας αναπτύχθηκε από την εταιρεία *LadeAs* στην Νορβηγία, με την ονομασία *Vindskip (Vindskip's Wind Power System)* [76]. Το *Vindskip* είναι ένα υβριδικό εμπορικό πλοίο κατασκευασμένο με σκοπό τη βιώσιμη μεταφορά, που χρησιμοποιεί ως μέσο πρόωσης την αιολική ενέργεια και το LNG. Ο σχεδιασμός της γάστρας του πλοίου είναι πρωτοποριακός, τόσο άνωθεν όσο και κάτωθεν της ισάλου γραμμής, όπως παρουσιάζεται στην

Εικόνα 27. Το πλοίο περιλαμβάνει γάστρα σχεδιασμένη συμμετρικά με τη μορφή αεροτομής με σκοπό την αξιοποίηση της σχετικής ταχύτητας του ανέμου. Καθώς η απόλυτη ταχύτητα του ανέμου μπορεί να μετρηθεί από ένα σταθερό πλοίο, η σχετική ταχύτητα του ανέμου παρατηρείται καθώς το πλοίο βρίσκεται σε κίνηση. Το σύστημα με τις αεροτομές γάστρας αξιοποιεί την σχετική ταχύτητα του ανέμου, δημιουργώντας μια θετική δύναμη κατά μήκος του πλοίου που βοηθά στην πρόωση του.

Η υβριδική τεχνολογία περιλαμβάνει μηχανή καύσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Η κατανάλωση καυσίμου μειώνεται σημαντικά, καθώς ο αεροδυναμικός σχεδιασμός της γάστρας δημιουργεί ώση στο πλοίο, και διατηρεί την ταχύτητα του σταθερή κατά τον πλου.

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για πλοία *Ro-Ro*, *RoPax*, επιβατηγά και πλοία μεταφοράς container [76].



Εικόνα 27. Αναπαράσταση του υβριδικού συστήματος «*Vindskip*» της εταιρείας *Lade AS* με τις αεροτομές στον σχεδιασμό της γάστρας [76].

6.2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (PV)

Ένα «πράσινο πλοίο» μπορεί να είναι εξοπλισμένο σε μεγάλο βαθμό με φωτοβολταϊκά συστήματα, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, σε περιοχές πλεύσης που υπάρχει επαρκής ηλιοφάνεια.

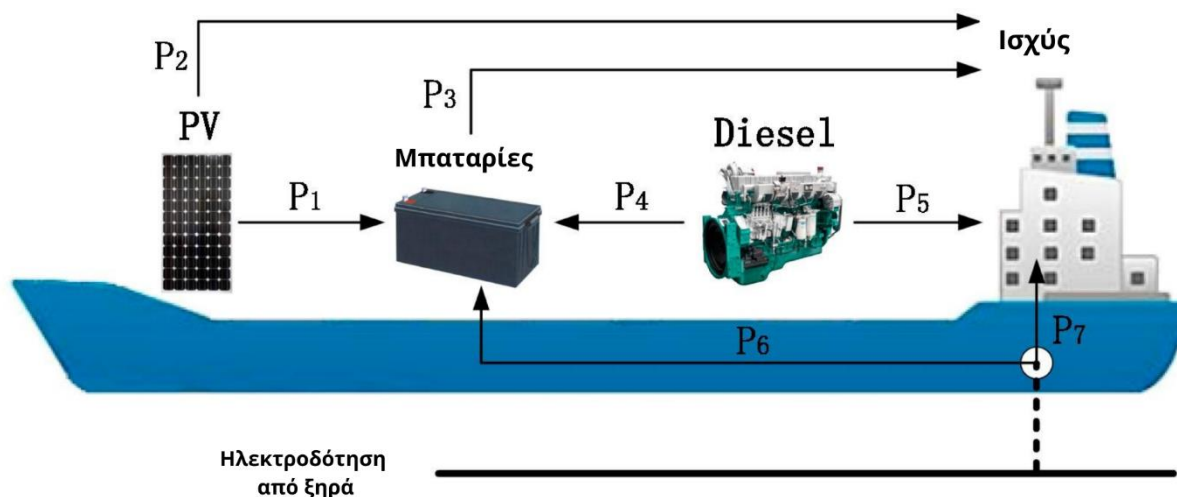
Η πρώτη εφαρμογή υβριδικών συστημάτων εκμετάλλευσης ηλιακής ακτινοβολίας έγινε στο πλοίο *PlanetSolar*, που ταξίδεψε για 19 μήνες από το Μονακό το 2010. Το πλοίο διαθέτει φωτοβολταϊκά πάνελ που καλύπτουν επιφάνεια 537 m² και περιέχουν 38000 ξεχωριστές φωτοβολταϊκές κυψέλες. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες λιθίου συνολικού βάρους 11 τόνων [77] (**Εικόνα 28**). Φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν επίσης εγκατασταθεί στο πλοίο *Auriga Leader*, τύπου *Ro-Ro*, 60.000 GT της εταιρείας *NYK Line* το 2011.



Εικόνα 28. Το *MS Turanor PlanetSolar*, το πρώτο ηλιακό πλοίο.
(Πηγή: <https://e-nautilia.gr/ms-turanor-planetsolar>)

Η εφαρμογή αυτή περιλαμβάνει ένα υβριδικό σύστημα που αποτελείται ντιζελοκινητήρα και περισσότερα από 300 φωτοβολταϊκά πάνελ μαζί σε σύστημα μπαταριών. Τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν έως και το 10% της απαιτούμενης ενέργειας για την λειτουργία του πλοίου *Auriga Leader* [78]. Το κόστος της εγκατάστασης των πάνελ είναι περίπου 3000 δολάρια ανά *KW* παραγόμενης ισχύος. Το κόστος εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ σε πλοία εκτιμάται ότι θα συνεχίσει να μειώνεται μέσα στα επόμενα χρόνια, λόγω της αναμενόμενης ανάγκης για την χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και της συνεχιζόμενης ανάπτυξης νέων τεχνολογιών σε συστήματα αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [79].

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε πλοία συνήθως αποτελεί τμήμα ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας ώστε να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες του πλοίου και πραγματοποιείται μετά από κατάλληλη οικονομοτεχνική μελέτη. Στην Εικόνα 29 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός υβριδικού συστήματος που αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, μπαταρίες, κινητήρα *diesel* και σύστημα ηλεκτροδότησης από την ξηρά (*cold-ironing*) κατά τον ελλιμενισμό.



Εικόνα 29. Σχηματική αναπαράσταση υβριδικού συστήματος αποτελούμενο από φωτοβολταϊκά πάνελ (*PV*), μπαταρίες, κινητήρα *diesel* και σύστημα ηλεκτροδότησης από ξηρά (*cold-ironing*) (Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218315688#fig1>)

Η αξιοποιήσιμη ηλιακή ενέργεια καθορίζεται από το γεωγραφικό πλάτος, τις κλιματικές συνθήκες και το δρομολόγιο του πλοίου. Για το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος και την εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας, προαπαιτείται η καταγραφή της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις διαδρομές του πλοίου. Η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια υπολογίζεται ως το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης ανά μονάδα επιφάνειας (KWh/m^2), και μπορεί να εκφραστεί ως ωριαία, μηνιαία ή ετήσια ποσότητα [80]. Για το βέλτιστο σχεδιασμό και εγκατάσταση ηλιακών συστημάτων σε πλοία θα πρέπει να υπάρχουν επαρκή δεδομένα για το κλίμα των περιοχών πλεύσης, καθώς το πλοίο θα πρέπει να είναι σε θέση να ταξιδέψει από λιμάνι σε λιμάνι, αξιοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερο την ηλιακή ενέργεια. Οι τύποι των φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιούνται σε μια τέτοια εγκατάσταση καθορίζουν την τελική απόδοση του συστήματος. Υπάρχουν τρεις τύποι πάνελ που συνήθως χρησιμοποιούνται: μονοκρυσταλλικού πυριτίου, πολυκρυσταλλικού πυριτίου και εύκαμπτα πάνελ άμορφου πυριτίου. Τα πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι τα πιο αποδοτικά και πιο διαδεδομένα, ενώ τα πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι λιγότερο αποδοτικά, αλλά ελαφρώς οικονομικότερα στην παραγωγή τους [79]. Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται από τις συστοιχίες φωτοβολταϊκών μπορεί να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές

(μπαταρίες), με σκοπό τη χρήση της κατά τις ώρες που δεν είναι διαθέσιμη άμεσα η ηλιακή ακτινοβολία.

Οι *Nyanya et al.*, το 2021 [79], υπολόγισαν την απόδοση ενός συστήματος αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας για ένα φορτηγό πλοίο χύδην φορτίου με τα εξής χαρακτηριστικά: ολική χωρητικότητα 25.606 GT, ολικό μήκος $L_{OA} = 179\text{ m}$, ολικό πλάτος $B = 32\text{ m}$ και ταχύτητα πλεύσης 13 κόμβων. Η συνολική ενέργεια που παράγεται από την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου σε επιφάνεια καταστρώματος 5728 m^2 με συνολική απόδοση 20%, υπολογίστηκε ότι είναι ίση με 149 KW κατά μέσο όρο για κάθε ταξίδι. Επίσης, ο συνδυασμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων με σύστημα εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας (σταθερά ιστία) υπολογίζεται ότι μπορεί να παράγει έως και 1,566 MW ανά ταξίδι με σταθερή ταχύτητα 13 κόμβων [79]. Αποτέλεσμα των υπολογισμών αυτών είναι πως ο συνδυασμός αυτών των δύο «πράσινων» τεχνολογιών παρέχει τη δυνατότητα μείωσης των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου κατά 35,52 %. Αυτό σημαίνει πως χρησιμοποιώντας συστήματα αξιοποίησης εναλλακτικών πηγών ενέργειας στα πλοία, μειώνονται οι εκπομπές ρύπων, αλλά και τα λειτουργικά έξοδα. Έχει υπολογιστεί ότι μείωση της ταχύτητας του πλοίου στο 56% της ταχύτητας συνήθους πλεύσης, παρέχει τη δυνατότητα στο πλοίο να ταξιδεύει αποκλειστικά με τη χρήση ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές [79].

6.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η κυματική ενέργεια θεωρείται μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας μεγάλης ισχύος. Με την εφαρμογή της κατάλληλης τεχνολογίας, η κυματική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ενέργεια πρόωσης του πλοίου.

Η τεχνολογία που έχει μελετηθεί πειραματικά για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας περιλαμβάνει πτυσσόμενα πτερύγια (*flapping foils*) προσαρτημένα με βραχίονες στη γάστρα του πλοίου, τα οποία μπορούν να κινούνται ελεύθερα στο κατακόρυφο επίπεδο και ανάλογα με τις κινήσεις του πλέοντος σκάφους στους κυματισμούς, ώστε να δημιουργείται βοηθητική πρόωση. Η βιομιμητική τεχνολογία που εφαρμόζεται στην περίπτωση αυτή προσομοιάζει την κίνηση των πτερυγίων θαλάσσιων θηλαστικών, που τους επιτρέπει να

κινούνται στο υδάτινο περιβάλλον. Το σύστημα αξιοποιεί την καθ' ύψος ταλάντωση του πλοίου κατά τον άξονα «Z» (*heave*), και την στροφική ταλάντωση κατά τον άξονα «Y» (προνευστασμός ή *pitch*) του πλοίου στον κυματισμό.

Στην

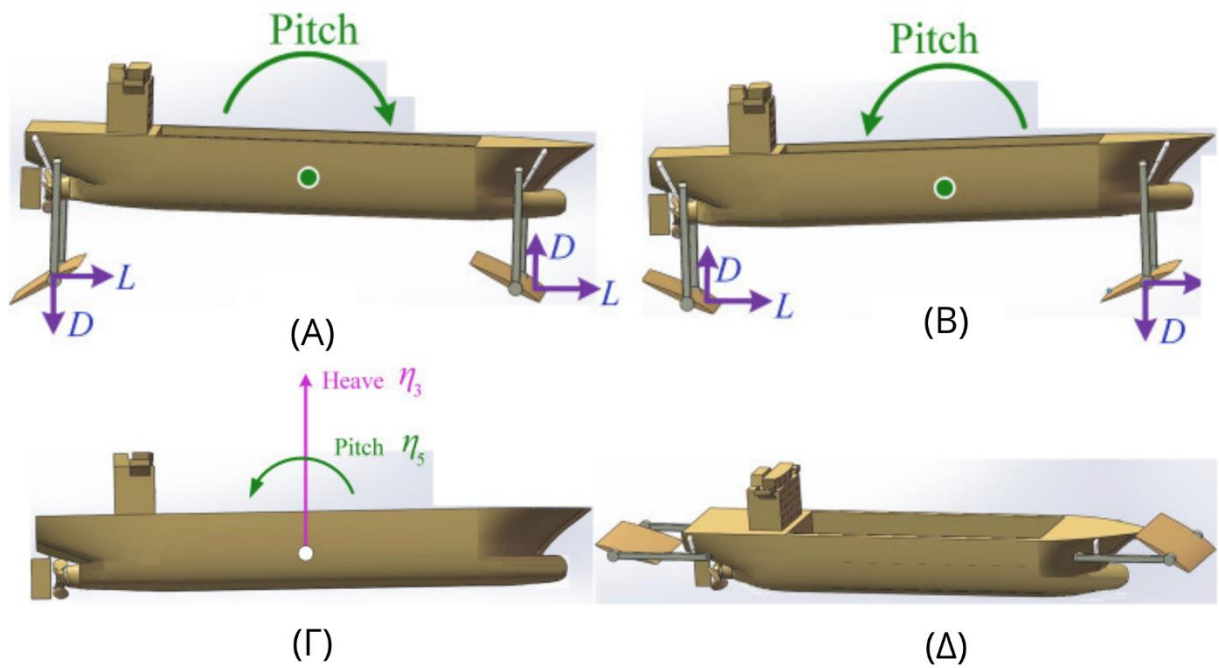
Εικόνα 30 αναπαρίσταται δοκίμιο φορτηγού πλοίου με σύστημα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας. Τα πτερύγια βρίσκονται προσαρτημένα με βραχίονες στο κάτω μέρος της γάστρας, πρωραία και πρυμναία. Όταν το πλοίο εκτελεί στροφικές ταλαντώσεις κατά τον άξονα «Y» (*pitch*), το σύστημα πτερυγίων μετακινείται κάθετα μέσα στο νερό. Η κίνηση αυτή αξιοποιείται για την πρόωση του πλοίου ενώ ταυτόχρονα μειώνει το μέγεθος του προνευστασμού (*pitching*) του πλοίου κατά την κίνηση του στο νερό. Όπως φαίνεται στην

Εικόνα 30, το πλοίο είναι σε θέση να εκμεταλλεύεται την κίνηση από την κυματική ενέργεια ανεξάρτητα εάν η κίνηση αυτή, κατά τον άξονα «Y», πραγματοποιείται πλώρα ή πρύμνα του πλοίου. Στην

Εικόνα 30Γ αναπαρίστανται οι δυο κυριότερες κινήσεις που κάνει το πλοίο στον κυματισμό: *pitching* (προνευστασμός) και *heaving* (καθ' ύψος ταλάντωση κατά τον άξονα «Z»). Το σύστημα πτερυγίων μπορεί να αναδιπλωθεί όπως φαίνεται στην

Εικόνα 30Δ. Οι βραχίονες είναι εξοπλισμένοι με υδραυλικό σύστημα που επιτρέπει στο πτερύγιο να αναδιπλώνεται και να αναπτύσσεται.

Στην περίπτωση που απαιτείται αύξηση της ταχύτητας πλεύσης ή κατά την πλεύση σε ήρεμες θάλασσες, το σύστημα πτερυγίων θα πρέπει να μπορεί να αναδιπλωθεί ώστε να μην αποτελεί εμπόδιο επιβραδύνοντας την πλεύση [81].



Εικόνα 30. Δοκίμιο φορτηγού πλοίου με σύστημα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας (A, B), οι κινήσεις του πλοίου στον κυματισμό (Γ), και αναδίπλωση συστήματος πτερυγίων (Δ).

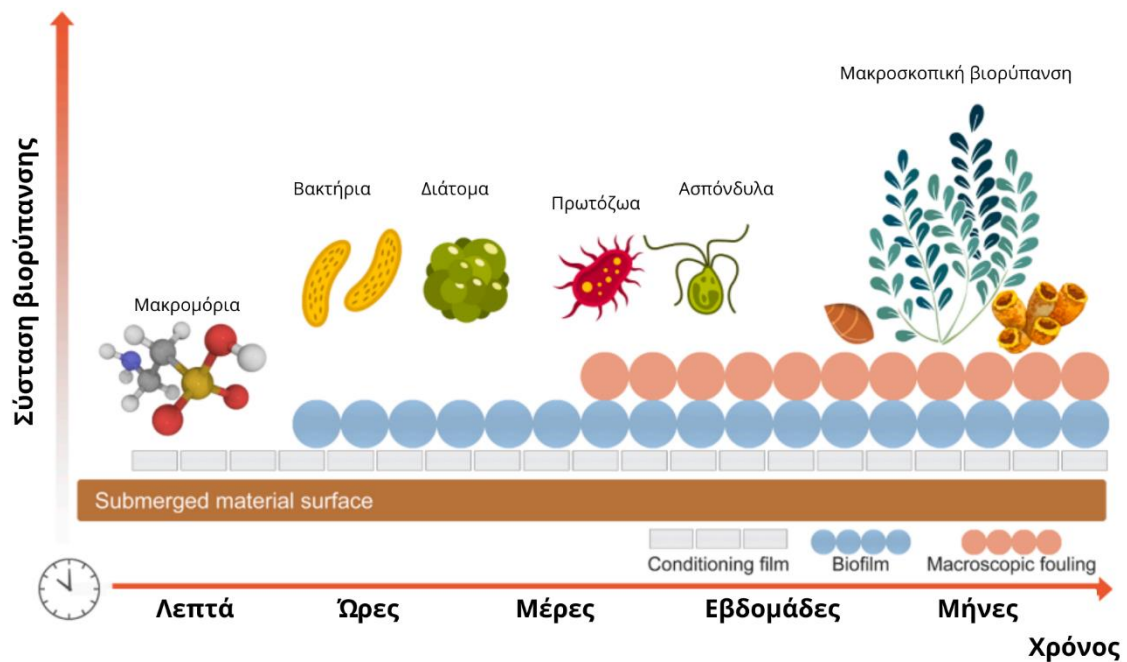
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (HIGH PERFORMANCE ANTI FOULING COATINGS) ΚΑΙ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Στις επιφάνειες στερεών σωμάτων που βρίσκονται βυθισμένες στο θαλασσινό νερό παρατηρείται συσσώρευση μικροοργανισμών που προσκολλώνται και αναπτύσσονται, επιφέροντας αύξηση της τραχύτητας των επιφανειών. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται βιορύπανση ή βιοσυσσώρευση (*biofouling*) και επιφέρει μείωση στην αποδοτικότητα των πλοίων και των θαλάσσιων κατασκευών. Η τράχυνση της επιφάνειας στα ύφαλα του πλοίου αυξάνει την τριβή κατά την πλεύση, με αποτέλεσμα να αυξάνεται και η κατανάλωση καυσίμου. Το γεγονός αυτό επιφέρει επιβάρυνση τόσο στο κόστος λειτουργίας του πλοίου, όσο και στο περιβάλλον από τις εκπομπές επιπρόσθετων ρύπων. Σημαντική είναι επίσης η μείωση του χρόνου ζωής των υλικών πάνω στα οποία αναπτύσσεται η βιορύπανση, και η ταυτόχρονη αύξηση του κόστους συντήρησης των πλοίων και των θαλάσσιων κατασκευών λόγω της ανάπτυξης αυτής. Επίσης, η μεταφορά της χλωρίδας και πανίδας από ένα υδάτινο οικοσύστημα σε άλλο, μέσω της βιορύπανσης, συμβάλλει στην αποσταθεροποίηση των τοπικών οικοσυστημάτων, προκαλώντας προβλήματα για τα εδώδιμα είδη.

Η βιορύπανση οποιασδήποτε επιφάνειας βυθισμένης σε υδάτινο περιβάλλον είναι μια φυσική και αναπόφευκτη διαδικασία. Τα στάδια ανάπτυξης μικροοργανισμών κατά τη διαδικασία αυτή φαίνονται στην Εικόνα 31. Μετά τη βύθιση ενός σώματος στο νερό, οργανικά βιομόρια, όπως πολυσακχαρίτες και πρωτεΐνες, με τη συνεργική δράση ανόργανων ουσιών, προσκολλώνται απευθείας στην επιφάνεια του βυθισμένου στερεού και δημιουργούν μια λεπτή μεμβράνη. Μετά την πάροδο ικανού χρονικού διαστήματος (της τάξης μερικών λεπτών ή ωρών), αναπτύσσονται οι πρώτες αποικίες βακτηρίων και διατόμων (οργανισμών που αφθονούν στο θαλάσσιο περιβάλλον ή βιοπλαγκτόν), με αποτέλεσμα η αρχική μεμβράνη να μετατρέπεται σταδιακά σε βιοεπίστρωση (βιοφίλμ). Αυτή η διαδικασία μπορεί να συμβεί και αντίστροφα καθώς τα βακτήρια και τα διάτομα μπορούν να αποκολληθούν από τη βυθισμένη επιφάνεια. Στη συνέχεια πρωτόζωα και ασπόνδυλα προσελκύονται από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του ανεπτυγμένου περιβάλλοντος πάνω στην επιφάνεια και σχηματίζουν μικροσκοπικές κοινότητες. Σε κάποιους τύπους αντιρρυπαντικών επιφανειών ευνοείται η ανάπτυξη των διατόμων στις συνθήκες περιβάλλοντος της βιοεπίστρωσης. Αυτοί οι οργανισμοί

εκκρίνουν κολλώδεις ουσίες που τους επιτρέπουν να προσκολλώνται στην επιφάνεια του στερεού, γεγονός που δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για τον πολλαπλασιασμό τους. Τελικά, σχηματίζεται μια συνεκτική βιοεπίστρωση, με πάχος που φτάνει μέχρι και τα 500 μm [82]. Ακολούθως, και για χρονικό διάστημα μερικών εβδομάδων, αναπτύσσονται μικροοργανισμοί, όπως άλγη και οστρακοειδή, οι οποίοι δημιουργούν μια μακροσκοπική αναπτυσσόμενη περιβαλλοντική κοινότητα.

Η βιορύπανση είναι μια δυναμική διαδικασία, η εξέλιξη της οποίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το είδος και η σύσταση του θαλάσσιου πυθμένα, οι κλιματικές συνθήκες, η γεωγραφική θέση, η θερμοκρασία και σύσταση του θαλασσινού νερού και άλλοι.



Εικόνα 31. Σχηματική αναπαράσταση των τυπικών σταδίων ανάπτυξης της βιορύπανσης.

Για την αντιμετώπιση της βιορύπανσης των επιφανειών στερεών σωμάτων, βυθισμένων μέσα στη θάλασσα, χρησιμοποιούνται ειδικά υφαλοχρώματα με τα οποία γίνεται επικάλυψη της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας των πλοίων. Τα ύφαλα μέρη της γάστρας του πλοίου επιστρώνονται με ειδικά χρώματα από τα οποία απελευθερώνονται τοξικές ουσίες που

παρεμποδίζουν την προσκόλληση μικροοργανισμών και την ανάπτυξη θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδας πάνω στις επιφάνειες.

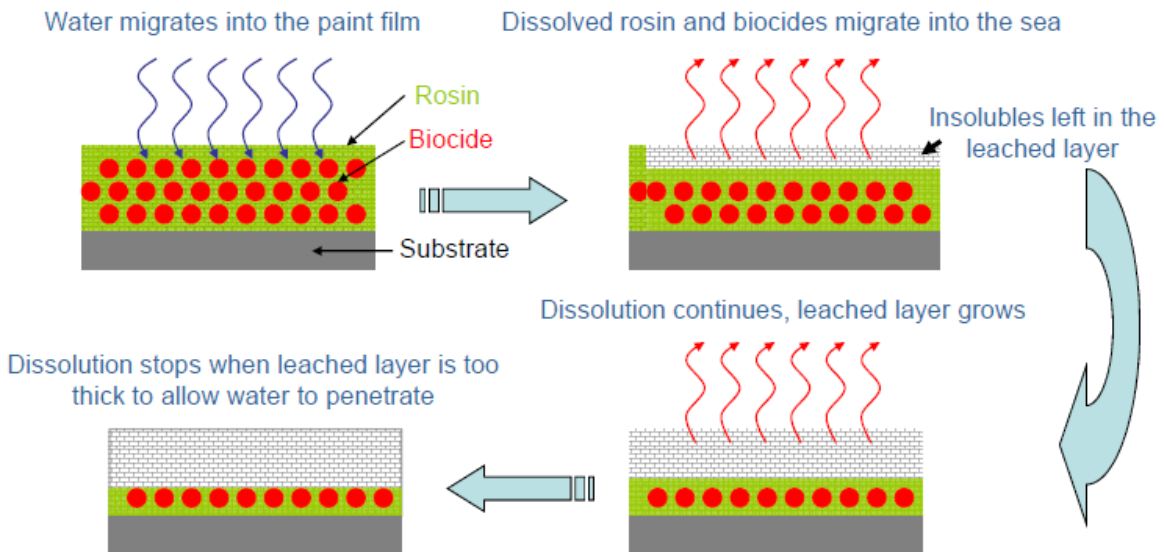
Από τη δεκαετία του 1950 και μέχρι το 2003, η χρήση οργανομεταλλικών ενώσεων του κασσίτερου (*organotin compounds*) όπως ο τριβουτυλοκασσίτερος (*TBT*) [82], είχε ευρεία εφαρμογή στα συμβατικά υφαλοχρώματα. Η τοξικότητα αυτών των ουσιών για το θαλάσσιο περιβάλλον και για τον άνθρωπο, οδήγησε στην πλήρη απαγόρευση της χρήσης τους σε υφαλοχρώματα, από το 2008. Με στόχο την αντικατάσταση των τοξικών ουσιών στα υφαλοχρώματα από άλλες δραστικές, αλλά λιγότερο τοξικές ουσίες, η επιστημονική και εμπορική κοινότητα έχουν προχωρήσει στη δημιουργία υφαλοχρωμάτων «νέας γενιάς» τα οποία περιέχουν κυρίως ενώσεις του χαλκού με βιοκτόνα δράση. Παράλληλα, αναπτύχθηκαν εναλλακτικές τεχνολογίες, που δεν περιέχουν βιοκτόνα συστατικά, αλλά ουσίες προερχόμενες από οργανισμούς του φυσικού περιβάλλοντος.

7.1. ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΒΙΟΚΤΟΝΟ ΔΡΑΣΗ

Οι σύγχρονες τεχνολογίες υφαλοχρωμάτων περιλαμβάνουν τις παρακάτω [83]:

7.1.1. ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ (*CONTROL DEPLETION POLYMER - CDP*) [83]

Τα υφαλοχρώματα αυτού του τύπου περιέχουν βιοκτόνες ουσίες ενσωματωμένες σε υδατοδιαλυτή ρητίνη. Η διάλυση της ρητίνης γίνεται με ελεγχόμενο τρόπο μέσα στο νερό, οπότε σταδιακά απελευθερώνονται οι δραστικές ουσίες, οι οποίες καταστρέφουν τους μικροοργανισμούς που επιχειρούν να προσκολληθούν στη βρεχόμενη επιφάνεια του σκάφους. Τα υφαλοχρώματα *CDP* είναι προϊόντα χαμηλού κόστους και χαμηλής αποτελεσματικότητας. Μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι η ευθραυστότητα της ρητίνης που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχίες στην επίστρωση, ενώ η αποτελεσματικότητά της μειώνεται, λόγω μείωσης του ρυθμού διάλυσης, εάν το πλοίο είναι ακίνητο. Επιβράδυνση της διάλυσης της ρητίνης παρατηρείται επίσης με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα τη μείωση της δραστικότητας των υφαλοχρωμάτων αυτού του τύπου. Η συνήθης διάρκεια ζωής των προϊόντων αυτών είναι 3 έτη. Ο μηχανισμός δράσης των υφαλοχρωμάτων *CDP* φαίνεται στην Εικόνα 32.

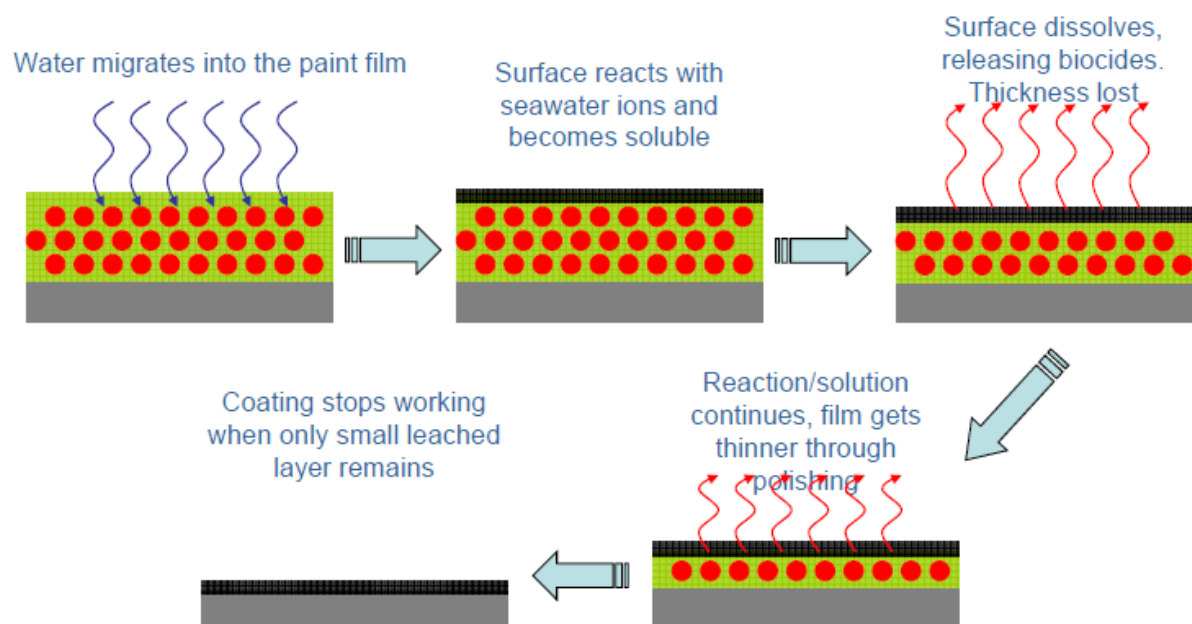


Εικόνα 32. Μηχανισμός δράσης υφαλοχρωμάτων CDP.

(Πηγή: https://www.ashrae.gr/EEinS2015/EEinS2015_Gougoulidis.pdf)

7.1.2. ΑΥΤΟΛΕΙΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΥΜΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΑ (*SELF POLISHING COPOLYMER - SPC*) [83]

Τα υφαλοχρώματα αυτού του τύπου αποτελούνται κυρίως από ακρυλική ρητίνη και ενώσεις μετάλλων που δρουν ως βιοκτόνα συστατικά. Περιέχουν συστατικά όπως ο ακρυλικός χαλκός ή ο ακρυλικός ψευδάργυρος, αλλά και ποσότητες άλλων ενισχυτικών βιοκτόνων. Τα βιοκτόνα συστατικά εκλύονται στο υδατικό περιβάλλον μέσω σταδιακής υδρόλυσης της επιφάνειας του υφαλοχρώματος κατά τον πλου. Σε σχέση με τα υφαλοχρώματα τύπου *CDP*, τα *SPC* καθώς διαλύονται, δημιουργούν μια ομαλή επιφάνεια αντιρρυπαντικής επίστρωσης στην επιφάνεια της γάστρας (Εικόνα 33). Τα σύγχρονα υφαλοχρώματα τύπου *SPC* επιτυγχάνουν σταθερή αντιρρυπαντική δράση, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους, μέχρι την ολική ανάλωση της προστατευτικής επίστρωσης. Τα προϊόντα αυτής της κατηγορίας είναι υψηλότερου κόστους, αλλά και καλύτερης απόδοσης από τα *CDP* και η προστατευτική τους δράση καλύπτει χρονικό διάστημα 12-90 μηνών [84].



Εικόνα 33. Μηχανισμός δράσης υφαλοχρωμάτων του τύπου *SPC*.

(Πηγή: https://www.ashrae.gr/EEinS2015/EEinS2015_Gougoulidis.pdf)

7.1.3. ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΑΥΤΟΛΕΙΑΙΝΟΜΕΝΑ (SELF-POLISHING) ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΑ

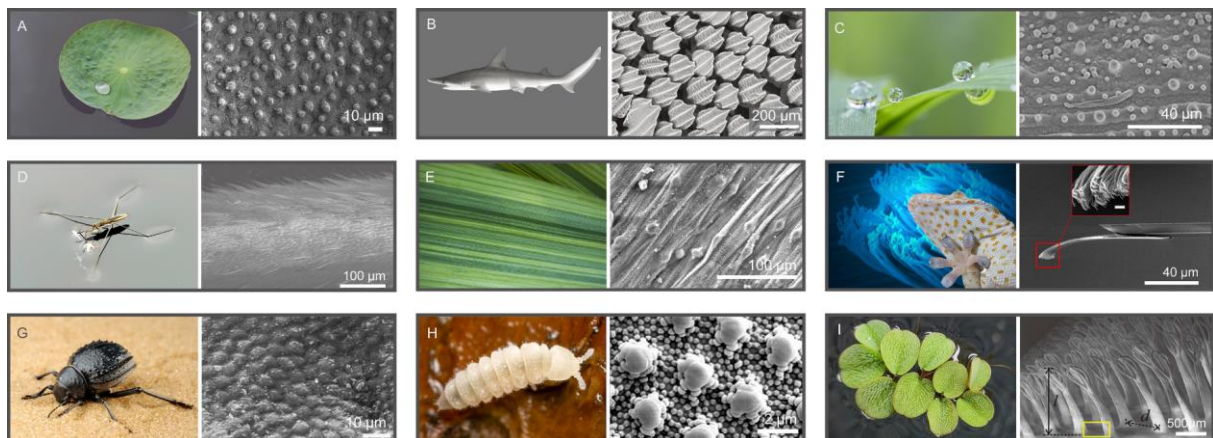
Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται υφαλοχρώματα με ιδιότητες που αποτελούν συνδυασμό των ιδιοτήτων των *CDP* και *SPC*. Τα υβριδικά αυτολειαινόμενα υφαλοχρώματα προκύπτουν από το συνδυασμό διαφορετικών ομοπολυμερών και συμπολυμερών ενώσεων. Τα συνδεδεμένα συστατικά που χρησιμοποιούνται σ' αυτόν τον τύπο υφαλοχρωμάτων είναι κατά συστάδες συμπολυμερή που αποτελούνται από μια κεντρική αλυσίδα πολυδιμεθυλοσιλοξανίου με προεκτάσεις πολυ(ε-καπρολακτόνης). Μ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συνδυασμός των επιμέρους ιδιοτήτων των υφαλοχρωμάτων *CPD* και *SPC*, που αφορούν την διαλυτότητα και την υδροφοβικότητα [85]. Ο χρόνος ζωής τους κυμαίνεται μεταξύ 3 και 5 ετών. Για την αποδοτική λειτουργία των υβριδικών υφαλοχρωμάτων απαιτείται η συνεχής κίνηση του πλοίου, όπως ισχύει και για τα υφαλοχρώματα *CPD* και *SPC*. Η παραμονή του πλοίου σε ακινησία για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 20 ημερών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού απομάκρυνσης της εξωτερικής στοιβάδας της επίστρωσης και οδηγεί σε αδυναμία απελευθέρωσης των βιοκτόνων ουσιών και την έναρξη της διαδικασίας βιορύπανσης στη γάστρα του πλοίου.

7.2. «ΠΡΑΣΙΝΕΣ» ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΗ ΒΙΟΚΤΟΝΕΣ ΟΥΣΙΕΣ

Στην φύση, πολλά ζώα και φυτά έχουν αναπτύξει επιφάνειες ανθεκτικές στη βιορύπανση. Αντλώντας έμπνευση από το περιβάλλον, η επιστημονική έρευνα έχει προσανατολιστεί στη δημιουργία υφαλοχρωμάτων που μιμούνται τις ικανότητες αυτών των οργανισμών. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ποικίλες τεχνολογίες που εφαρμόζουν στρατηγικές που ακολουθεί η ίδια η φύση για την αντιμετώπιση του ανεπιθύμητου βιοαποικισμού [82]. Ορισμένες από αυτές περιγράφονται στη συνέχεια.

7.2.1. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΕΣ / ΝΑΝΟΣΚΟΠΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΔΟΜΕΣ

Τα τελευταία χρόνια έχει επιχειρηθεί η ανάπτυξη νέας τεχνολογίας υφαλοχρωμάτων που βασίζεται στην ικανότητα κάποιων οργανισμών, όπως τα νούφαρα και ο καρχαρίας, να αναπτύσσουν επιδερμίδα με μικροδομές που αποτρέπουν την προσκόλληση και ανάπτυξη μικροοργανισμών (βιοαποικισμός).



Εικόνα 34. Φωτογραφία οργανισμού με αντιρρυπαντικές ικανότητες και μικροσκοπική εικόνα των μικροδομών επιφανείας του, από Νούφαρο (A), Καρχαρία (B), Φύλλα Ρυζιού (C), Πόδια αμφίβιου εντόμου (water strider) (D), Φύλλο καλαμιάς (E), Γκέκο (F), Σκαθάρι (G), Πόδουλο (H), και Φύλλα *Salvinia molesta* (I) [82].

Η επιστημονική έρευνα συνεχίζεται όσον αφορά την ανάπτυξη υφαλοχρωμάτων με την τεχνολογία των μικρο- ή νανοσκοπικών επιφανειακών δομών. Διαφόρων ειδών υλικά και ποικίλες τεχνολογίες έχουν δοκιμαστεί, και εξακολουθούν να δοκιμάζονται, για την δημιουργία

αποδοτικών αντιρρυπαντικών επιστρώσεων αυτού του τύπου. Ορισμένα πολυμερή που εμφανίζουν μικρή σκληρότητα και μικρή ελαστικότητα έχουν βρεθεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην απομάκρυνση της βιορύπανσης [82].

7.2.2. ΦΥΣΙΚΑ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΤΙΚΑ

Φυσικά προϊόντα με αντιρρυπαντική δράση έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή σύγχρονων αποδοτικών υφαλοχρωμάτων. Τέτοια προϊόντα είναι τα κοράλλια και τα σφουγγάρια. Τα φυσικά αντιρρυπαντικά αποτελούν φιλικότερη επιλογή για το περιβάλλον, καθώς σε αντίθεση με τα χημικά βιοκτόνα, δεν είναι τοξικά για το υδάτινο περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για την ανακάλυψη φυσικών αντιρρυπαντικών και συνθετικών αναλόγων τους. Σύμφωνα με το *U.S. Navy Program* [86], ένα υλικό με $EC_{50} < 25 \mu g/mL$ μπορεί να θεωρηθεί ικανό αντιρρυπαντικό για την αντιμετώπιση της βιορύπανσης.

7.2.3. ΥΔΡΟΦΙΛΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ «HYDROGEL»

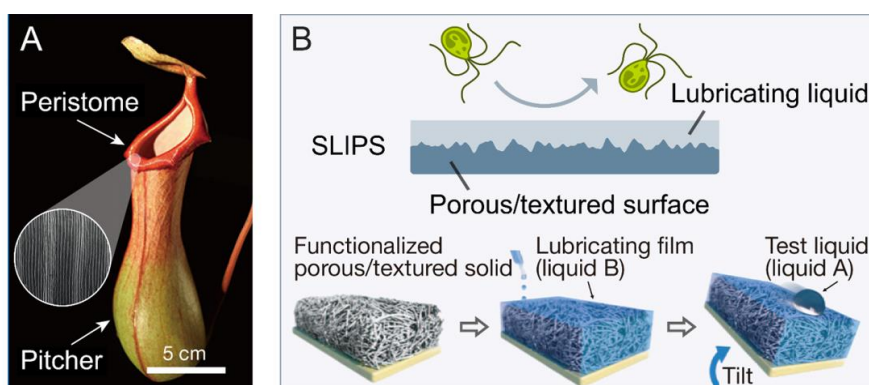
Η βλέννα που εκκρίνεται φυσιολογικά και καλύπτει την επιδερμίδα των υδρόβιων και των αμφίβιων οργανισμών συνεισφέρει στην αντιμετώπιση του ανεπιθύμητου βιοαποικισμού. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτής της βλέννας είναι μια φυσική υδρογέλη, γνωστή ως *mucin* [82]. Τόσο η φυσική αυτή βλέννα όσο και οι συνθετικές υδρογέλες με ανάλογη συμπεριφορά είναι εξαιρετικά υδρόφιλες και σχηματίζουν στο νερό μια χαρακτηριστική στοιβάδα γέλης (*gel*). Η στιβάδα αυτή έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και λειτουργεί ως ένα φυσικό εμπόδιο αποτρέποντας την ισχυρή πρόσφυση των υδρόβιων μικροοργανισμών στη βυθισμένη επιφάνεια.

Οι υδρογέλες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις φυσικές και τις συνθετικές. Οι συνθετικές περιλαμβάνουν υδρογέλες με βάση την πολυαιθυλενογλυκόλη (*PEG*), την πολυβινυλική αλκοόλη (*PVAL*), το πολυακρυλαμίδιο (*PAM*), διάφορες πολυουρεθάνες (*PU*) και ακρυλικά πολυμερή [82]. Παράδειγμα προϊόντος που χρησιμοποιεί την τεχνολογία αυτή είναι το αντιρρυπαντικό χρώμα *ActiGuard* της εταιρείας *Hempel* [87].

7.2.4. ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΑ ΜΕ ΟΛΙΣΘΗΡΕΣ ΥΓΡΕΣ ΠΟΡΩΔΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ (*SLIPPERY LIQUID-INFUSED POROUS SURFACES - SLIPS*)

Τα υφαλοχρώματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούν τεχνολογία που βασίζεται στην φυσιομορφία του γαιοσκώληκα και του σαρκοφάγου φυτού νηπενθές ή κανάτα (*pitcher plant*), τα οποία έχουν επιδερμικά πορώδη υφή και περιέχουν υγρό εγκλωβισμένο μέσα στις μικροδομές που σχηματίζονται στην επιδερμίδα τους. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργείται επιφάνεια με αντικολλητικές ιδιότητες, γεγονός που καθιστά τα *SLIPS* ικανά να εμποδίζουν τη βιοσυσσώρευση στη γάστρα του πλοίου.

Το σαρκοφάγο φυτό νηπενθές (Εικόνα 35Α) έχει την ικανότητα να ακινητοποιεί το θύμα του πάνω σε μια ολισθηρή επιφάνεια στο περιστόμιο του. Η επιφάνεια αυτή είναι τόσο ολισθηρή που προκαλεί την αναπόφευκτη ολίσθηση των εντόμων από το περιστόμιο στο εσωτερικό του φυτού, όπου γίνεται πέψη μέσω της έκκρισης γαστρικών υγρών. Αντίστοιχα, οι γαιοσκώληκες έχουν την ικανότητα να λιπαίνουν την επιδερμίδα τους οπότε να αποφεύγουν με αυτόν τον τρόπο την προσκόλληση βακτηρίων από το χώμα. Η χαρακτηριστική αντικολλητική ιδιότητα των επιφανειών *SLIPS* προκύπτει όταν διαβρέχονται από το νερό ή άλλο υγρό λίπανσης. Η σχηματική αναπαράσταση της δομής των επιφανειών *SLIPS* παρουσιάζεται στην Εικόνα 35B.



Εικόνα 35. Το σαρκοφάγο φυτό νηπενθές ή κανάτα (*pitcher plant*) **(A)**. Δομή των *SLIPS* **(B)** [82].

Παρόλο που τα *SLIPS* έχουν προσφέρουν υψηλό επίπεδο προστασίας από τη βιορύπανση, η μελέτη και εφαρμογή τους παραμένουν ακόμα σε εργαστηριακό επίπεδο, λόγω της ασταθούς φυσιολογίας τους.

7.2.5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

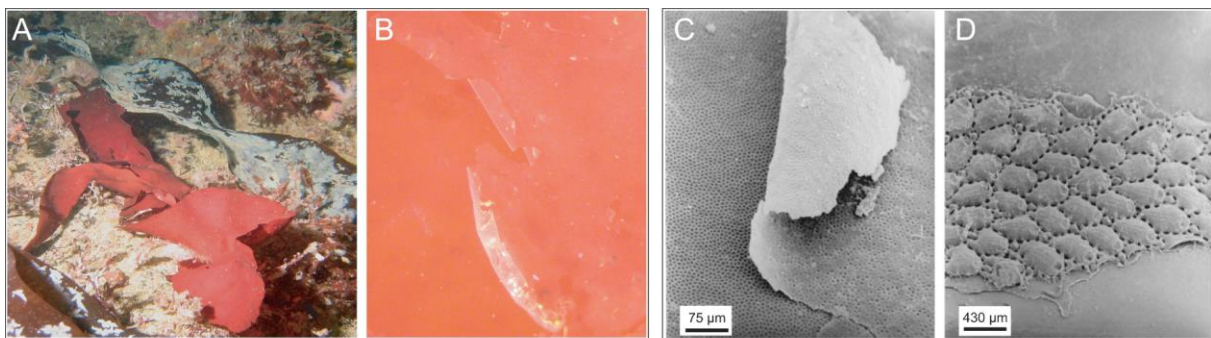
Αυτή η τεχνολογία είναι εμπνευσμένη από την ικανότητα κάποιων θαλάσσιων οργανισμών να ανανεώνουν την επιδερμίδα τους αποβάλλοντας τμήμα αυτής που έχει αλλοιωθεί από τη βιορύπανση. Η χαρακτηριστική επιδερμίδα των δελφινιών, η οποία με την ελαστική μορφή της δημιουργεί ένα ασταθές περιβάλλον υπό συνθήκες τυρβώδους ροής, αποτελεί ένα ακόμα παράδειγμα δυναμικής επιφάνειας, της οποίας η παροδική αστάθεια δυσχεραίνει την προσκόλληση των μικροοργανισμών.

Σύμφωνα με τους Xie *et.al.* [88], ορίζεται ως δυναμική επιφάνεια αυτή που τροποποιείται καθώς ανανεώνεται συνεχώς μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το 2019 προτάθηκε η εφαρμογή αντιρρυπαντικής τεχνολογίας δυναμικής επιφάνειας (*dynamic surface antifouling - DSA*). Πολλές φυσικές επιφάνειες αναπτύσσονται δυναμικά. Κατά τη διάρκεια της ζωής τους οι κατεστραμμένες επιφάνειες των φυλλωμάτων αναγεννούνται, η χαμένη λιπαρότητα των *SLIPS* αναπαράγονται, και τα φυσικά αντιρρυπαντικά που εκκρίνονται ανανεώνονται. Οι βιορρυπαντικοί μικροοργανισμοί που προσκολλώνται σε βυθισμένες στο νερό επιφάνειες, απορρίπτονται μέσα από τη διαδικασία ανανέωσης της ίδιας της επιφάνειας [88]. Ένα ακόμα παράδειγμα αποδοτικής αντιρρυπαντικής δραστηριότητας αποτελεί η μαλακή επιδερμίδα διαφόρων οργανισμών, όπως τα δελφίνια και η άλγη των κοραλλιών, που έχει την ικανότητα να δημιουργεί ασταθές περιβάλλον στην επιφάνεια υπό συνθήκες τυρβώδους ροής.

7.2.5.1. ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΑ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΚΑΤΕΣΤΡΑΜΜΕΝΗΣ ΕΠΙΘΗΛΙΑΚΗΣ ΣΤΟΙΒΑΔΑΣ

Το 1984 Ιάπωνες επιστήμονες ερεύνησαν τον αντιρρυπαντικό μηχανισμό της άλγης των κοραλλιογενών υφάλων, και παρατήρησαν πως η απόρριψη της επιθηλιακής στοιβάδας σχετίζεται με την αποβολή της βιορύπανσης [82]. Οι σύγχρονες ερευνητικές προσπάθειες εστιάζονται στην ανάπτυξη τεχνικών επίστρωσης επιφανειών με τη μέθοδο δυναμικής αποβολής της κατεστραμμένης στοιβάδας επιφάνειας, και τη μέθοδο δημιουργίας ασταθών επιφανειών [82]. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 36Α, η κόκκινη άλγη «*Dilsea carnosa*» παρουσιάζει μια πολύ καθαρότερη επιφάνεια σε σύγκριση με το περιβάλλον της, ενώ στην

Εικόνα 36B διακρίνονται παρωνυχίδες, στοιχεία αρχής απόρριψης εξωτερικής επιδερμικής στοιβάδας. Τα επιθηλιακά κύτταρα που έχουν αποκολληθεί από την επιδερμίδα της κόκκινης άλγης φαίνονται στις Εικόνα 36C και 33D. Παρόμοια φαινόμενα έχουν παρατηρηθεί και στις επιδερμίδες μεγάλων θαλάσσιων θηλαστικών, όπως τα δελφίνια και οι φάλαινες [82]. Με στόχο την υιοθέτηση αυτής της φυσικής διεργασίας, αναπτύχθηκε εργαστηριακά ένα ειδικό προϊόν επίστρωσης και εφαρμόστηκε σε μεταλλικά δοκίμια τα οποία εμφάνισαν σε μικρότερο βαθμό στοιχεία βιορύπανσης, σε σύγκριση με το μη επιστρωμένο μέταλλο [82].



Εικόνα 36. Φωτογραφία κόκκινης άλγης «*Dilsea carnososa*» που επιδεικνύει μια πολύ καθαρότερη επιφάνεια σε σύγκριση με το περιβάλλον της **(A)**. Στοιχεία αρχής απόρριψης επιθηλιακής στοιβάδας από την κόκκινη άλγη **(B)**. Μικροφωτογραφίες από επιθηλιακά κύτταρα ξεφλουδίσματος από την επιδερμίδα της κόκκινης άλγης **(C) & (D)** [82].

Το φαινόμενο της επιφανειακής επιθηλιακής απόρριψης που συναντάται σε θαλάσσιους οργανισμούς αποτέλεσε τη βασική ιδέα για την παρασκευή αυτο-λιπαινόμενων και διασπώμενων συμπολυμερών επιστρώσεων που αποτελούν συστατικά των σύγχρονων υφαλοχρωμάτων. Τα περισσότερα από τα υφαλοχρώματα αυτής της τεχνολογίας που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί στη ναυτιλία περιέχουν ακρυλικά ή πολυουρεθανικά συμπολυμερή που υδρολύονται κατά την παραμονή τους μέσα στο νερό, ώστε η εξωτερική τους επιφάνεια να διαλύεται σταδιακά και να απορρίπτεται μαζί με την προσκολλημένη βιοσυσσώρευση [82].

7.2.5.2. ΥΦΑΛΟΧΡΩΜΑΤΑ ΕΜΠΝΕΥΣΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΑΣΤΑΘΟΥΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ορισμένοι θαλάσσιοι οργανισμοί, όπως τα δελφίνια και τα μαλακά κοράλλια, έχουν την ικανότητα απομάκρυνσης της βιορύπανσης μέσω φυσιολογικών μηχανισμών. Το κυριότερο χαρακτηριστικό τους που επιτρέπει την εφαρμογή τέτοιων μηχανισμών είναι η χαρακτηριστική δομή της επιδερμίδα τους, που δημιουργεί ασταθείς επιφάνειες σε συνθήκες τυρβώδους ροής. Επιπλέον, οι προσκολλημένοι μικροοργανισμοί μπορούν εύκολα να αποκολληθούν υπό συνθήκες δυναμικών παραμορφώσεων. Ακολουθώντας αυτή τη στρατηγική, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι δυναμικών επιφανειών, όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Ασταθείς επιφάνειες λόγω ηλεκτρισμού και πεπιεσμένου αέρα**

Η τεχνολογία δημιουργίας ηλεκτροενεργής δυναμικής επιφάνειας, που φαίνεται στην Εικόνα 37Α, χρησιμοποιεί ηλεκτρικό φορτίο το οποίο προκαλεί παραμόρφωση της επιφάνειας, έτσι ώστε να διευκολύνεται η αποκόλληση των βακτηρίων που βιοσυσσωρεύονται (86). Επίσης έχουν αναπτυχθεί επιστρώσεις από σιλικονούχα ελαστομερή υλικά των οποίων η αστάθεια ελέγχεται μέσω πεπιεσμένου αέρα (πνευματικά), όπως φαίνεται στην Εικόνα 37Β. Με λειτουργία προγραμματισμένης παραμόρφωσης της επιφάνειας, σε εργαστηριακές δοκιμές επιτεύχθηκε αποκόλληση της βιοσυσώρευσης από τη βακτηριακή μεμβράνη σε ποσοστό άνω του 90% [82].

Αυτές οι μέθοδοι ενάντια στην βιορύπανση είναι αποδοτικές και ταυτόχρονα φιλικές προς το περιβάλλον. Παρόλα αυτά, η λειτουργία αυτών των τεχνολογιών παραγωγής υφαλοχρωμάτων απαιτεί περισσότερη ενέργεια, η οποία επιφέρει αύξηση του κόστους σε εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας.

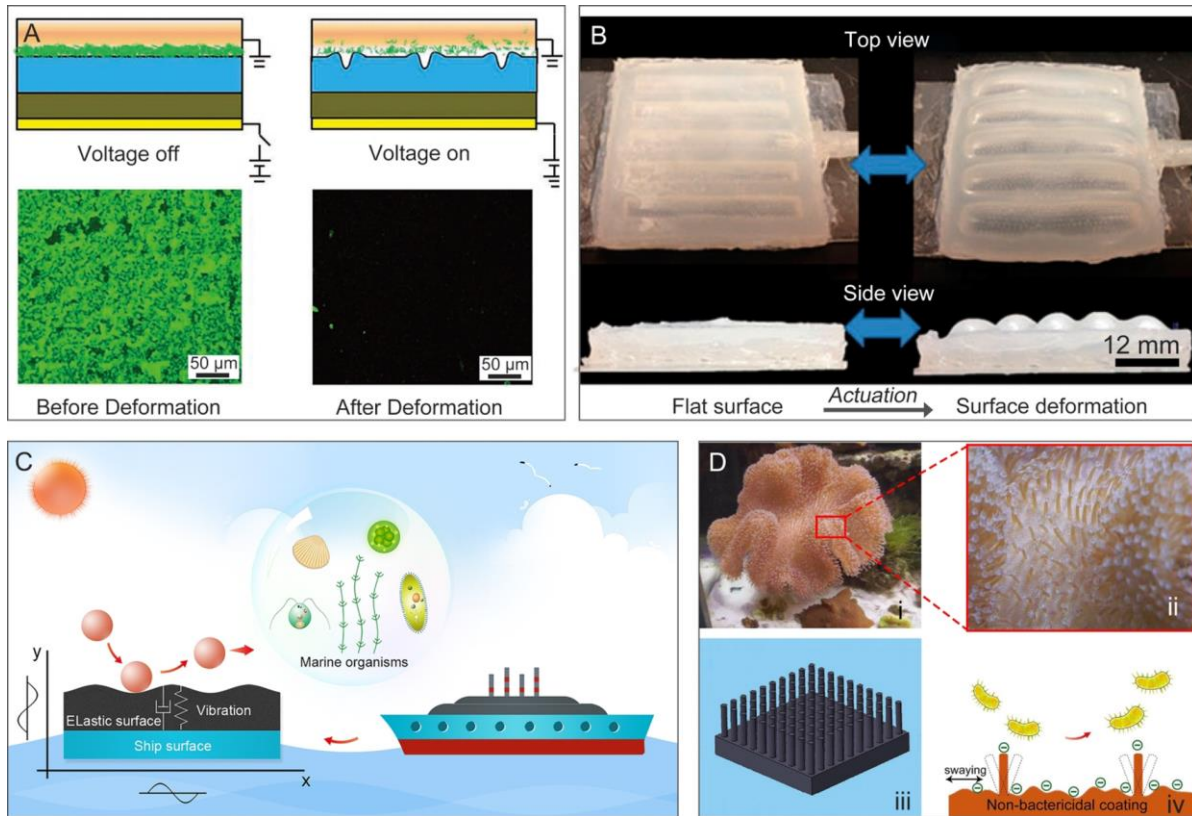
- **Ασταθείς επιφάνειες λόγω τυρβώδους ροής**

Η ελαστικότητα μιας επιφάνειας μπορεί να λειτουργήσει ως αποτρεπτικός παράγοντας της ανάπτυξης βιορύπανσης. Με πρότυπο το ελαστικό δέρμα των δελφινιών, σχεδιάστηκαν υφαλοχρώματα ανάλογης δομής που κατασκευάζονται από πολύ μαλακό φυσικό ελαστικό, και διερευνήθηκε η απόδοση τους στη μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης κατά την πλεύση. Άλλες εφαρμογές έγιναν με ελαστομερή σιλικόνης με την κατάλληλη διαμόρφωση και

προσθήκες, ώστε να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά του υλικού [82]. Τα αποτελέσματα των μέχρι τώρα δοκιμών έδειξαν πως η υψηλή ελαστικότητα οδηγεί σε μεγαλύτερη ικανότητα παραμόρφωσης, που ενισχύει την απώθηση των μικροοργανισμών καθώς υπάρχει μια συνεχόμενη κίνηση στις επιφάνειες. Αυτή η συμπεριφορά της επιφάνειας δυσχεραίνει την προσκόλληση μικροοργανισμών και τη συσσώρευση βιορύπανσης. Ο μηχανισμός αυτού του φαινομένου παρουσιάζεται στην Εικόνα 37C.

Σε πρόσφατη έρευνα των Jin *et al.* [82], παρουσιάζεται ένας νέος τύπος δυναμικής επιφάνειας, εμπνευσμένης από το μαλακό κοράλλι *Sarcophyton trocheliophorum*, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 37D. Η επιφάνεια είναι ισχυρά υδρόφοβη και παρουσιάζει ικανότητα αποκόλλησης επιθηλιακής στοιβάδας. Οι επιφάνειες των μαλακών κοραλλιών είναι καλυμμένες με πολλά μαλακά πλοκάμια που κινούνται αυθόρμητα κατά τη ροή του νερού. Επομένως, τα βακτήρια δεν μπορούν να προσκολληθούν ισχυρά στην επιφάνεια του μαλακού κοραλλιού λόγω της ασταθούς επιφάνειας του. Το αποτέλεσμα είναι να εμφανίζει η επιφάνεια υψηλή αντίσταση στη βιοσυσσώρευση. Ο αντιρρυπαντικός μηχανισμός αυτής της τεχνολογίας αναπαρίσταται στην Εικόνα 37D (iv). Η αντιρρυπαντική ικανότητα εκδηλώνεται με φυσικές και μηχανικές διαδικασίες και ως εκ τούτου είναι φιλική προς το περιβάλλον. Όμως, η βέλτιστη σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών των πλοκαμιών (ύψους, πυκνότητας, ακτίνας) και της αντιρρυπαντικής αποδοτικότητας δεν είναι ακόμα γνωστή, και απαιτείται περαιτέρω έρευνα στο θέμα αυτό.

Κατά την ανάπτυξη υφαλοχρωμάτων υψηλής απόδοσης εμπνευσμένων από τη φύση (βιομιμητισμός), θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το οικονομικό κόστος και το περιβαλλοντικό όφελος. Στην πράξη, διάφοροι επιπρόσθετοι παράγοντες, όπως η ανάπτυξη πολύ ασθενών απωστικών δυνάμεων μεταξύ επιφάνειας και μικροοργανισμών, ανίκανων να απωθήσουν τους μικροοργανισμούς που προσκολλώνται, η υψηλή ανθεκτικότητα των μικροοργανισμών που καταφέρνουν να προσκολληθούν, ή ασθενείς δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων των υπό έρευνα υλικών είναι πιθανό να αποτελέσουν περιοριστικούς παράγοντες της αποτελεσματικότητας των νέων υφαλοχρωμάτων.



Εικόνα 37. Αντιρρυπαντικός μηχανισμός ηλεκτροενεργής δυναμικής επιφάνειας (το πράσινο χρώμα αναπαριστά τα βακτήρια) **(A)**. Αντιρρυπαντικός μηχανισμός μέσω διαμόρφωσης δυναμικής επιφάνειας με πνευματική ενεργοποίηση **(B)**. Αντιρρυπαντική δράση ελαστικών επιφανειών **(C)**. Το μαλακό κοράλλι *Sarcophyton trocheliophorum* (i) και τα πλοκάμια του (ii), τεχνητά πλοκάμια με βάση τη μαλακή ελαστική σιλικόνη (iii) και αναπαράσταση του αντιβιορρυπαντικού μηχανισμού στα μαλακά πλοκάμια (iv) **(D)** [82].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΑΕΡΟΛΙΠΑΝΣΗ ΓΑΣΤΡΑΣ – AIR DRAG REDUCTION

Η τριβή που αναπτύσσεται όταν ένα ρευστό ρέει κοντά σε στερεή επιφάνεια προκαλεί προβλήματα σε πολλές περιπτώσεις στη ναυτιλία. Για παράδειγμα, η τριβή επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των σωληνώσεων για τη μεταφορά νερού και λαδιού. Για τα πλοία, υπολογίζεται πως η αντίσταση που προκαλείται από την τριβή φτάνει σε ποσοστό 50-60% της συνολικής αντίστασης [89]. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που προκαλεί η δύναμη της τριβής είναι η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας των πλοίων και των αεροσκαφών.

Μια νέα εναλλακτική τεχνολογία για τη μείωση της αντίστασης του πλοίου είναι η αερολίπανση γάστρας (*bubble drag reduction*). Η τεχνολογία συνδυάζει πολλά οφέλη, καθώς είναι ασφαλής για τη λειτουργία του πλοίου, έχει χαμηλό κόστος, είναι φιλική προς το περιβάλλον και έχει υψηλή αποδοτικότητα [90]. Η αερολίπανση βασίζεται στη δημιουργία ενός στρώματος φυσαλίδων που είναι εξαιρετικά υδρόφοβο. Η μείωση της αντίστασης επιτυγχάνεται καθώς το πλοίο ολισθαίνει πάνω στο στρώμα φυσαλίδων αντί να βρίσκεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό. Η ολίσθηση πάνω σε εξαιρετικά υδρόφοβες επιφάνειες μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης από 5% - 56,9% [91]. Το στρώμα φυσαλίδων που αναπτύσσεται μεταξύ της στερεάς επιφάνειας της γάστρας και του θαλασσινού νερού προκαλεί μείωση της οπισθέλκουσας δύναμης (αντίστασης) κατά την πλεύση. Οι φυσαλίδες αέρα δημιουργούν ταυτόχρονα ένα λιπαντικό στρώμα για τη ροή του νερού.

Ο τρόπος διοχέτευσης φυσαλίδων αέρα στο οριακό στρώμα της τυρβώδους ροής καθορίζει την αλληλεπίδραση της επιφάνεια της γάστρας με το αέριο στρώμα που δημιουργείται. Το 2014 προτάθηκε από τους Kumagai *et al.* [92] μια νέα τεχνολογία εξοικονόμησης ενέργειας για τη μείωση της αντίστασης του πλοίου με χρήση μικρών φυσαλίδων. Η εξοικονόμηση ενέργειας για το πλοίο υπολογίστηκε ότι φτάνει το ποσοστό 5-15% [92].

Ο συντελεστής τριβής C_f σε συνθήκες αερολίπανσης υπολογίζεται ως ο λόγος της τριβής τ_w προς το $\frac{1}{2}$ του γινομένου της πυκνότητας του νερού ρ και του τετραγώνου της ταχύτητας ροής U_0 (εξίσωση 14).

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (14)$$

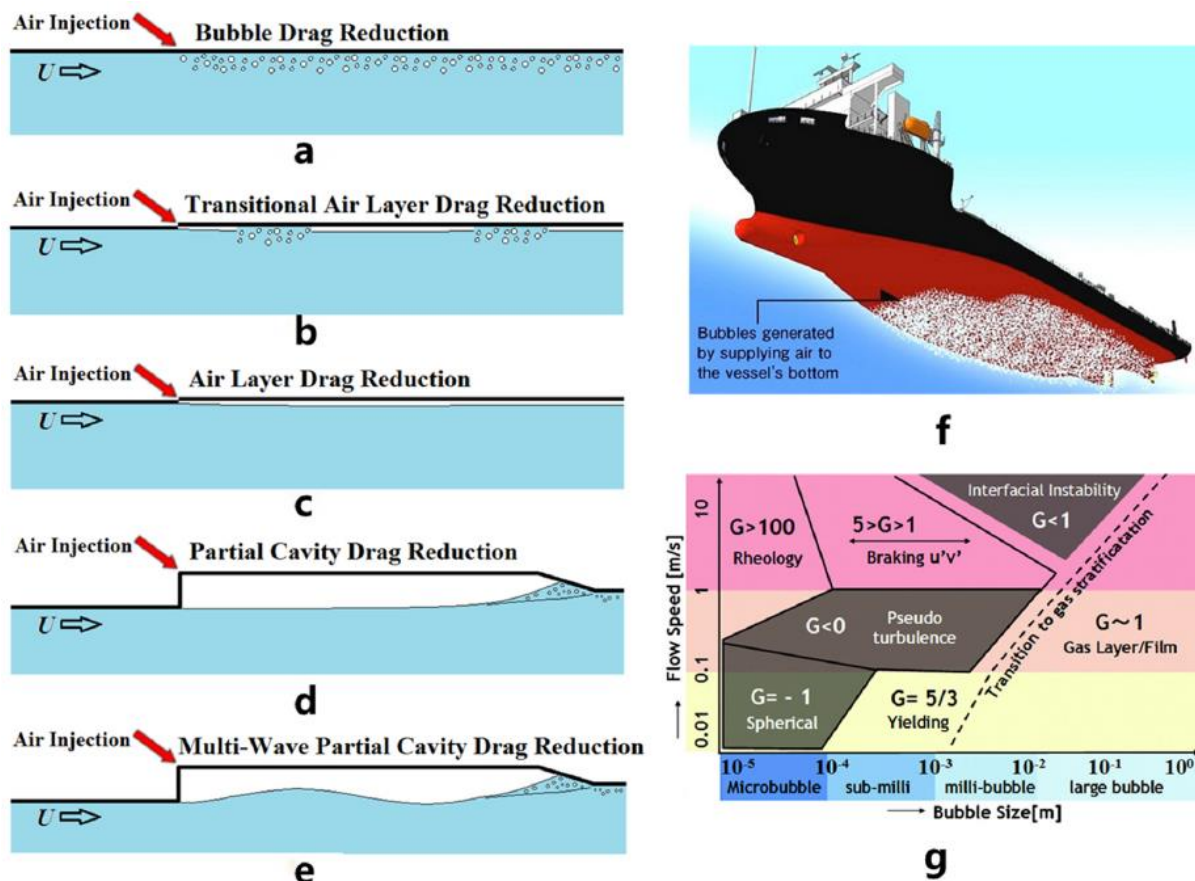
Η απόδοση της μείωσης της τριβής από την εξίσωση 15.

$$\eta_{DR} = \left(1 - \frac{C_f}{C_{f0}}\right) \times 100\% \quad (15)$$

όπου C_{f0} είναι ο συντελεστής τριβής της επιφανείας χωρίς την παρουσία φυσαλίδων.

Ο ρυθμός και ο τρόπος έγχυσης των φυσαλίδων είναι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την λιπαντική απόδοση του αέρα. Οι μικρές φυσαλίδες και το στρώμα αέρα μπορούν να συντηρηθούν όταν η έγχυση των φυσαλίδων στον πυθμένα της γάστρας γίνεται συνεχόμενα. Όταν οι φυσαλίδες εκχύνονται με ρυθμό μεγαλύτερο από μια καθορισμένη τιμή, προκαλούνται συγκρούσεις μεταξύ τους και ενώνονται σχηματίζοντας ένα στρώμα αέρα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι φυσαλίδες, τόσο ευκολότερος είναι ο σχηματισμός στρώματος αέρα. Η αλληλεπίδραση των φυσαλίδων που μετατρέπουν το στρώμα φυσαλίδων σε στρώμα αέρα παρουσιάζεται στην εικόνα 38 (g).

Έχουν διερευνηθεί δύο διαφορετικά φαινόμενα αερολίπανσης ανάλογα με το ρυθμό έγχυσης αέρα: η αερολίπανση με φυσαλίδες (*bubble drag reduction - BDR*) (εικόνα 38a) και η αερολίπανση με στρώμα αέρα (*air layer drag reduction - ALDR*) (εικόνα 38c) [90]. Για την πρώτη περίπτωση (τεχνολογία *BDR*) έχει διατυπωθεί πως όσο μικρότερο μέγεθος έχουν οι φυσαλίδες, τόσο μεγαλύτερη είναι η αποδοτικότητα του συστήματος για ίσο λόγο κενών προς πλήρωση (*void ratio*) [90]. Για τη διατήρηση του στρώματος αέρα στη δεύτερη περίπτωση (τεχνολογία *ALDR*) απαιτείται υψηλότερος ρυθμός έγχυσης. Σε πειραματικές δοκιμές εφαρμογής της *ALDR* παρατηρήθηκε μείωση της αντίστασης τριβής άνω του 80% [93]. Παρόλο που η *ALDR* είναι περισσότερο αποδοτική από τη *BDR*, ο υψηλός ρυθμός έγχυσης είναι δύσκολο να διατηρηθεί. Το σημείο έγχυσης του αέρα είναι ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη μείωση της αντίστασης. Έχει παρατηρηθεί πως η έγχυση αέρα στην πρωραία αρχή της επίπεδης επιφάνειας που σχηματίζεται στην τρόπιδα της γάστρας οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος αερολίπανσης, από την έγχυση αέρα υψηλότερα της επίπεδης επιφάνειας (Εικόνα 38f) [90].

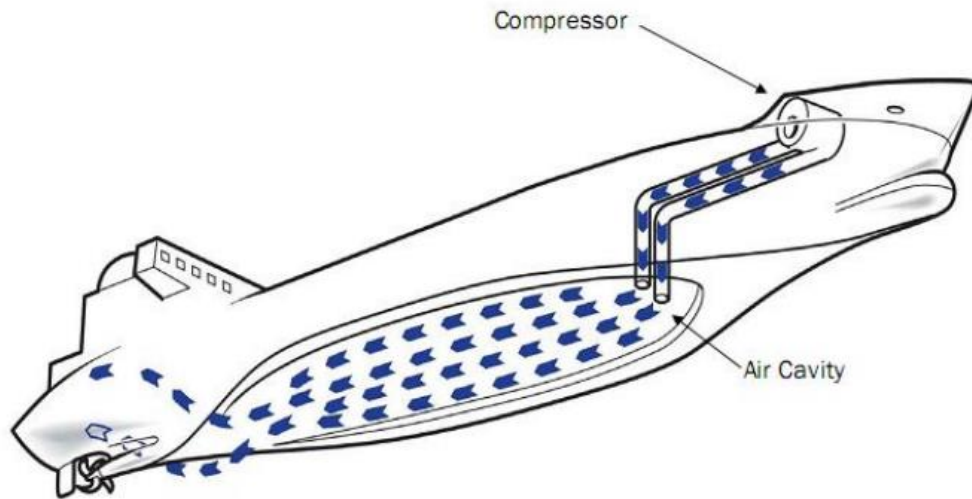


Εικόνα 38. Συστήματα αερολίπανσης με έγχυση αέρα στον πυθμένα του πλοίου: Αερολίπανση με φυσαλίδες (a), Μεταβατικό στάδιο από στρώμα φυσαλίδων σε στρώμα αέρα (b), Αερολίπανση με στρώμα αέρα (c), Μερική ολίσθηση με κοιλοότητες αέρα (d), Μερική ολίσθηση με κοιλοότητες αέρα σε κυματισμό (e), [89] Σύστημα έγχυσης αέρα στον πυθμένα του πλοίου (f), Διάγραμμα σχηματισμού στρώματος αερολίπανσης από φυσαλίδες (g) [90].

- **Σύστημα κοιλοτήτων Αέρα (Air Cavity System – ACS)**

Η αντίσταση τριβής κατά την πλεύση του πλοίου στο νερό μπορεί να περιοριστεί με τη μείωση της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας. Για τα μεγάλα εμπορικά πλοία η επίπεδη επιφάνεια στον πυθμένα του πλοίου είναι σχετικά μεγάλη και θεωρείται ιδανική για την τοποθέτηση συστήματος αερολίπανσης. Καθώς η μείωση του εκτοπίσματος δεν αποτελεί λύση αφού περιορίζει την λειτουργικότητα του πλοίου, ο εναλλακτικός σχεδιασμός της γεωμετρίας της γάστρας μπορεί να επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην προσπάθεια μείωσης της αντίστασης κατά την πλεύση [94].

Στις Εικόνες 38d και 38e παρουσιάζεται το στρώμα αέρα που δημιουργείται με την τεχνολογία της μερικής ολίσθησης (*Partial Cavity Drag Reduction – PCDR*). Η τοποθέτηση κατά το σχεδιασμό της γάστρας ειδικά μελετημένων κοιλοτήτων αέρα στον πυθμένα του πλοίου (Εικόνα 39), συμβάλει στην δημιουργία ενός εξαιρετικά υδρόφοβου περιβάλλοντος με ταυτόχρονη έγχυση αέρα από τα συστήματα ψεκασμού [90]. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνολογιών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα υψηλή αποδοτικότητα των συστημάτων για την μείωση της αντίστασης του πλοίου κατά την πλεύση του.



Εικόνα 39. Σχηματική αναπαράσταση πλοίου με σύστημα κοιλοτήτων αέρα (ACS) [90].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΑΥΞΗΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Η περιβαλλοντική προστασία μέσω του ελέγχου των εκπομπών ρύπων συνδέεται με την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης για την αποδοτικότητα των μηχανών και του σχεδιασμού του πλοίου. Αποδοτικότερη πρόωση θεωρείται η περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον, καθώς έχει λιγότερες εκπομπές ρύπων από την καύση.

Η αποδοτικότητα του πλοίου κατά την πλεύση εξετάζεται κυρίως από την πλευρά της βελτιστοποίησης της γάστρας και της έλικας. Κατά παράδοση, στα μεγάλα ποντοπόρα πλοία η επιλογή έλικας περιορίζεται σε μεγάλες έλικες με σταθερό ή ρυθμιζόμενο βήμα, και η βέλτιστη αποδοτικότητα της έλικας επιτυγχάνεται με την επιλογή της μεγαλύτερης δυνατής διαμέτρου και με βελτιστοποίηση του σχήματος ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες του πλοίου. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις η απόδοση της μεγάλης έλικας στο πίσω μέρος της γάστρας μπορεί να βελτιωθεί με την τοποθέτηση διάφορων συστημάτων ρύθμισης της ροής, όπως οι δακτύλιοι εξισορρόπησης ροής και τα πτερύγια καπακιού έλικας.

9.1. ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΙΚΑΣ

Η κίνηση του πλοίου παραδοσιακά επιτυγχάνεται με την χρήση έλικας που παράγει την απαιτούμενη ώση για την κίνηση του πλοίου. Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες ελίκων: οι έλικες σταθερού βήματος (*FPP*) και οι έλικες μεταβλητού βήματος (*CPP*). Η περιστροφή της έλικας δημιουργεί αναρρόφηση του νερού που βρίσκεται μπροστά της. Η ροή γύρω από την έλικα προσδιορίζεται από δύο συντελεστές, τον συντελεστή ποσοστού του ομόρρου w , που εκφράζει το ποσοστό μείωσης της ταχύτητας πρόσπτωσης, και τον συντελεστή t που εκφράζει τη μείωση ώσης. Κατά την κίνηση του πλοίου στο ρευστό, δημιουργείται μια ζώνη τριβής στην επιφάνεια της γάστρας, γνωστή και ως «οριακό στρώμα νερού». Η τιμή του συντελεστή ομόρρου προσδιορίζεται από το σχεδιασμό της γάστρας, το μέγεθος και τη θέση τοποθέτησης της έλικας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εναλλακτικού σχεδιασμού με βάση την τροποποίηση στα κύρια χαρακτηριστικά των πτερυγίων της έλικας, είναι η έλικα τύπου *Kappel* (Εικόνα 40). Η έλικα τύπου *Kappel* έχει σχεδιαστεί με ενσωματωμένο ακροπτερύγιο στα πτερύγια της έλικας που μειώνει τις απώλειες δίνης στα άκρα.



Εικόνα 40. Έλικα Τύπου *Kappel* τοποθετημένη στο φορτηγό πλοίου M/T Nordamerika (Πηγή: www.mek.dtu.dk/KAPPEL_Propeller).

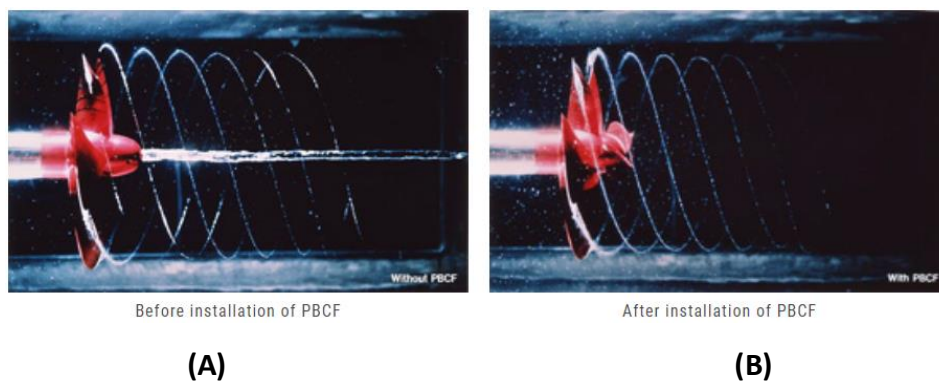
9.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΕΦΑΛΗΣ ΕΛΙΚΑΣ (*PROPELLER BOSS CAP FINS - PBCF*)

Το Σύστημα *Propeller Boss Cap Fin (PBCF)* - «Καπάκι» έλικας με πτερύγια, σε διάταξη για εξοικονόμηση ενέργειας αναπτύχθηκε αρχικά, το 1987, από την Ιαπωνική εταιρεία *Mitsui O.S.K Lines* και κατασκευάστηκε στη συνέχεια από την *Nakashima Mitsuwa Propeller*. Είναι μία ευρέως διαδεδομένη και αποδεδειγμένη Διάταξη Εξοικονόμησης Ενέργειας, εγκατεστημένη σε περισσότερα από 190 Ελληνικά πλοία και περισσότερα από 3.300 πλοία παγκοσμίως (Στοιχεία Μαρτίου 2019) [95]. Πρόκειται για μικρά πτερύγια (*fins*) που εφαρμόζονται στο υφιστάμενο ή σε νέο καπάκι προπέλας, και κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό του καπακιού.

Ένα από τα σπουδαιότερα οφέλη του συστήματος *PBCF* είναι η μείωση στην κατανάλωση καυσίμου σε ποσοστό 3-5%, που έμμεσα αποφέρει μείωση αντίστοιχα και στις τιμές των εκπεμπόμενων αέριων ρύπων. Η τοποθέτηση αυτή μειώνει τις δίνες και τους

στροβιλισμούς που έπονται της έλικας, συνεπώς αυξάνει την ώθηση που δέχεται το πλοίο. Επιπλέον, συνεισφέρει στην περιστροφή της έλικας, μειώνοντας την απαιτούμενη ροπή ισχύος στον ελικοφόρο άξονα.

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος καπακιού έλικας είναι η μείωση του στροβιλισμού που έπεται. Η διαφορά στην ταχύτητα της ροής ανάμεσα στην άνω και στην κάτω επιφάνεια της λεπίδας της προπέλας, παράγει μία ισχυρή κάθετη ροή από την άκρη της λεπίδας. Οι κάθετες αυτές ροές από κάθε λεπίδα αθροίζονται παράγοντας έναν ισχυρό στροβιλισμό της ροής (*Hub Vortex*). Στις έλικες που είναι τοποθετημένο το απλό καπάκι (*boss cap*) (Εικόνα 41A) παρατηρείται η δημιουργία μιας έντονης τυρβώδους ροής με ισχυρό στροβιλισμό. Στη δεξιά εικόνα φαίνεται ο στροβιλισμός να εξαλείφεται, καθώς η δίνη του νερού που έπεται της έλικας διασπάται από τα πτερύγια (*fins*) του συστήματος *PBCF*. Ο υδροδυναμικός σχεδιασμός του συστήματος πτερυγίων συμβάλλει στην πρόωση του πλοίου, μειώνει τη ροπή που απαιτεί ο άξονας, και κατά συνέπεια αυξάνει τον βαθμό απόδοσης της έλικας.

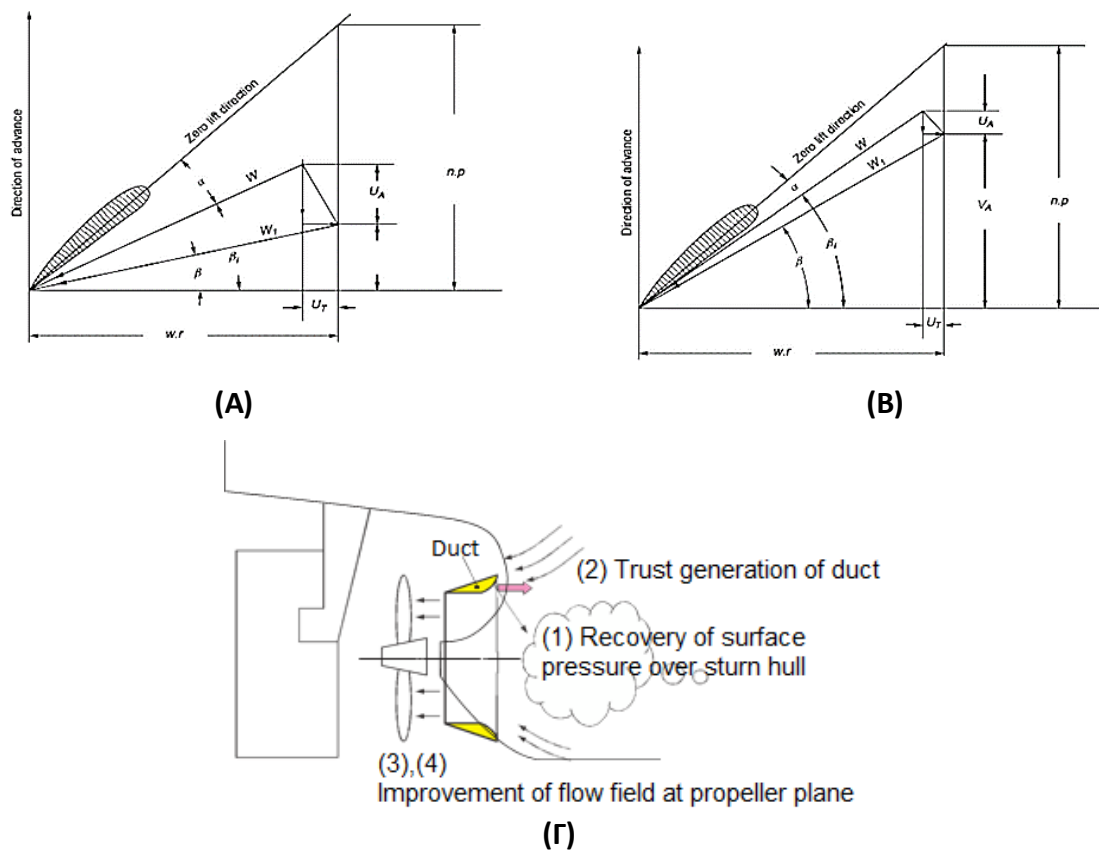


Εικόνα 41. Σύγκριση Συστροφής Ροής, πριν **(A)** και μετά **(B)** την τοποθέτηση *PBCF*, (Πηγή: Mitsui O.S.K. Lines www.mol.co.jp)

Τα πτερύγια του *PBCF* υπολογίζεται ότι μειώνουν την απαιτούμενη ροπή του άξονα κατά 3%, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η πρόωση κατά 1%. Ακόμα, το *PBCF* επιτυγχάνει εξοικονόμηση ενέργειας έως 5% στις ίδιες στροφές (*rpm*) της μηχανής, ενώ, στην ίδια ισχύ, η ταχύτητα του πλοίου αυξάνεται κατά περίπου 2% [95].

9.3. ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΡΟΗΣ (PROPELLER DUCT)

Ένα σύστημα έλικας με δακτύλιο εξισορρόπησης ροής αποτελείται από μια έλικα σταθερού ή μεταβλητού βήματος και έναν σταθερό ή περιστρεφόμενο δακτυλιοειδή αγωγό. Παραδείγματα τοποθέτησης δακτυλίων (*duct*) παρουσιάζονται στην Εικόνα 43. Ο δακτύλιος εξισορρόπησης αυξάνει την αξονική ταχύτητα του ρευστού και δημιουργεί ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας ροής γύρω από την έλικα. Η αύξηση της ταχύτητας ροής στην έλικα, γνωστή και ως ταχύτητα προχώρησης (V_A), επιτυγχάνει αύξηση του βαθμού απόδοσης της έλικας (η_B) για σταθερή γωνιακή ταχύτητα (ω), καθώς μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης (α) στα πτερύγια. Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της γωνίας πρόσπτωσης για μικρή (Εικόνα 42A) και για μεγάλη (Εικόνα 42B) ταχύτητα προχώρησης.



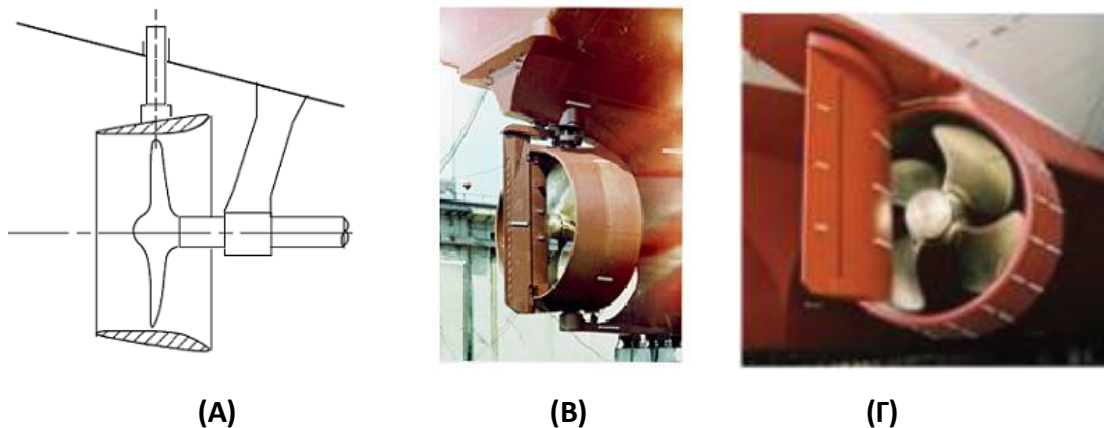
Εικόνα 42. Διαφορά γωνίας πρόσπτωσης (α) της ροής στα πτερύγια της έλικας για μικρή V_A (A) και για μεγάλη V_A (B), και Αρχές Εξοικονόμησης Ενέργειας δακτυλίων (Gamma) [96].

Ένας περιστρεφόμενος δακτύλιος μπορεί να έχει ένα ή δύο σημεία στήριξης, τοποθετημένα έτσι ώστε να είναι σε θέση να κινείται κατά τον άξονα περιστροφής. Η επιλογή του

περιστρεφόμενου ή του σταθερού δακτυλίου (*duct*) και οι τρόποι στήριξης του βασίζονται στην καταλληλότητα του αγωγού για το σύστημα για το οποίο προορίζεται.

Οι βασικές αρχές εξοικονόμησης ενέργειας από την τοποθέτηση δακτυλίου (*duct*) στην έλικα του πλοίου, όπως φαίνονται στην Εικόνα 43, συνοψίζονται παρακάτω [96]:

- (1) Ελέγχεται η ροή στην επιφάνεια της γάστρας, ευθυγραμμίζοντας τη ροή σε αξονική κατεύθυνση, και επομένως συμβάλλοντας στη μείωση της αντίστασης του πλοίου.
- (2) Παράγεται επιπλέον ώση από τον δακτύλιο σε συνδυασμό με την κατάλληλη μορφή του πτερυγίου της έλικας.
- (3) Αυξάνεται η ταχύτητα καθώς το πλοίο ωφελείται από την ομαλή ροή των απόνερων στη ζώνη δημιουργίας των δινών προς την έλικα.
- (4) Βελτιώνεται η συνολική απόδοση της έλικας, δημιουργώντας ένα ευνοϊκό πεδίο ροής και επιτρέποντας έναν ωφέλιμο σχεδιασμό έλικας.



Εικόνα 43. Είδη δακτυλιοειδών αγωγών έλικας (*ducts*). Περιστρεφόμενος κρεμαστός δακτύλιος **(Α)**, Περιστρεφόμενος δακτύλιος με κάθετη στήριξη **(Β)**, και Σταθερός δακτυλιοειδής αγωγός **(Γ)** [97].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΑΡΧΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LCA) ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Τα τελευταία χρόνια η φιλοσοφία του κύκλου της ζωής (*Life Cycle*) χαίρει μεγαλύτερης αποδοχής στις εκτιμήσεις περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Η ιδέα αυτή εισάγει μια νέα οπτική στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του ανθρώπου, παρουσιάζοντας μια μετάβαση από τις παραδοσιακές στρατηγικές προστασίας του περιβάλλοντος σε μία πιο σύγχρονη προσέγγιση, η οποία συμπεριλαμβάνει τη σύγχρονη περιβαλλοντική αντίληψη σχετικά με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Εξετάζοντας τη βιομηχανία μέσα από αυτή την σκοπιά παρουσιάζονται σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα η αποφυγή της εναπόθεσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ένα στάδιο του κύκλου της ζωής σε κάποιο άλλο ή σε άλλα εξωτερικά συστήματα, επιφέροντας ένα πρόσθετο εξωτερικό κόστος.

10.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Μία καλά δομημένη μέθοδος με την παραπάνω προσέγγιση είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Analysis - LCA*). Η *LCA* έχει τυποποιηθεί μέσα στο πλαίσιο των κανονισμών *ISO* και λαμβάνει υπόψη τον πλήρη κύκλο ζωής του υπό εξέταση συστήματος.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (*LCA*) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος Ανάλυσης Ενεργειακών/ Περιβαλλοντικών Συστημάτων, και αποσκοπεί στην ανάλυση και την αξιολόγηση της αλληλεπίδρασης που έχει ένα σύστημα με το περιβάλλον, όσον αφορά την αειφορία της παραγωγικής του διαδικασίας. Ο σκοπός αυτών των αναλύσεων είναι η δημιουργία ενός βιώσιμου μέλλοντος σε κοινωνικό και ατομικό επίπεδο.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι Ανάλυσης Περιβαλλοντικών Συστημάτων, με τη κάθε μία να έχει εφαρμογή σε διαφορετική περίπτωση. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω οι πιο γνωστές μέθοδοι:

- Ανάλυση Κύκλου Ζωής (*LCA*) – Μια μέθοδος ανάλυσης που αξιολογεί ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών της παραγωγής, της χρήσης, και της διαχείρισης των απορριμμάτων.

- Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (*Life Cycle Costing - LCC*) – Η μέθοδος αυτή υπολογίζει το συνολικό κόστος (περιβαλλοντικό και κοινωνικό) των διαδικασιών της ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας.
- Μέθοδος *MIPS (Material Input per Service unit)* – Μια ποσοτική μέθοδος ανάλυσης των υλικών ανά μονάδα υπηρεσίας.
- Ανάλυση Ροής Υλικών (*Material Flow Analysis – Bulk-MFA*) – Η μέθοδος παρουσιάζει την ροή των υλικών που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα.
- Εκτίμηση Επικινδυνότητας (*Risk Assessment – RA*) – Είναι μία γενική μέθοδος ανάλυσης και αφορά τις περιπτώσεις ατυχημάτων (για παράδειγμα, κατά τη χρήση χημικών ουσιών).
- Στρατηγική Περιβαλλοντικής Εκτίμησης (*Strategic Environmental Assessment – SEA*). Αφορά στο χειρισμό των περιβαλλοντικών πτυχών κατά τη λήψη αποφάσεων για την στρατηγική εφαρμογή προγραμμάτων, σχεδίων και πολιτικών.
- Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (*Environmental Impact Assessment - EIA*). Μέθοδος ανάλυσης που περιγράφει τις επιπτώσεις ενός συστήματος στο περιβάλλον, όπως για παράδειγμα την κατασκευή και τοποθέτηση μιας μονάδας αποτέφρωσης αποβλήτων [98].

Ο όρος «Ανάλυση Κύκλου Ζωής (*LCA*)», σύμφωνα με τον οργανισμό *US EPA (United States Environmental Protection Agency)*, αναφέρεται στη μεθοδολογία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των επιπτώσεων στο περιβάλλον από τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, ξεκινώντας από τις πρώτες ύλες που συλλέγονται από τη γη, μέχρι και τα τελικά προϊόντα που θα επιστρέψουν πάλι πίσω στη γη (*cradle to grave*). Αντίστοιχα, κατά την *SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry)*, η *LCA* αναφέρεται στη διαδικασία που εκτιμά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τα προϊόντα, τις διαδικασίες και τις σχετικές τους δραστηριότητες, καταγράφοντας και προσδιορίζοντας την συνολική ενέργεια και τις πρώτες ύλες που καταναλώνονται, όπως και τα απόβλητα που καταλήγουν στο περιβάλλον [99].

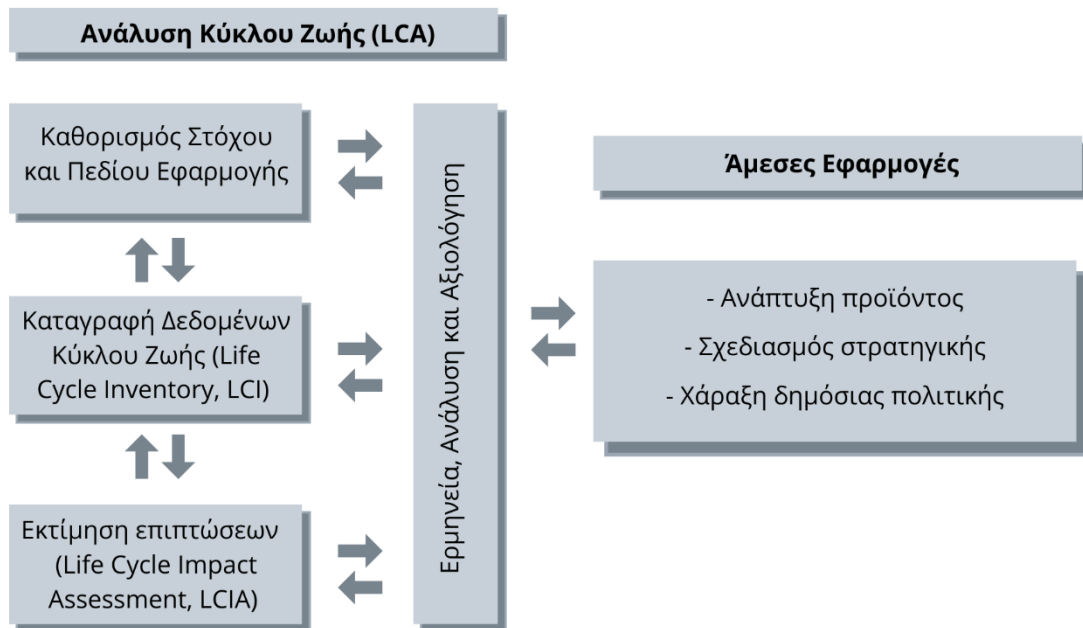
Με τον όρο «κύκλος ζωής» περιγράφονται οι κύριες δραστηριότητες της ζωής ενός προϊόντος από τις πρώτες ύλες και την διαδικασία για την παραγωγή του μέχρι και την κατάληξη του, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης και της συντήρησης του. Είναι μια επαναληπτική διαδικασία που επιτρέπει την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, συμπεριλαμβανομένων αυτών που συχνά δεν λαμβάνονται υπόψη σε πιο παραδοσιακές αναλύσεις (όπως για παράδειγμα την εξόρυξη πρώτων υλών, μεταφορά υλικών κλπ.). Με τον τρόπο αυτό παρέχεται μια πιο σφαιρική άποψη των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας, με σκοπό την βέλτιστη επιλογή των διαδικασιών που το συνοδεύουν καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του [100].

Η LCA αποτελεί ένα ευέλικτο εργαλείο για την ποσοτική καταγραφή των επιπτώσεων που έχει στο περιβάλλον ένα προϊόν, μια διαδικασία ή μια υπηρεσία. Πρωταρχικός στόχος της ανάλυσης είναι η επιλογή του βέλτιστου προϊόντος, και κάθε διαδικασίας ή υπηρεσίας που θα είναι το λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Η LCA είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάπτυξη νέων βελτιστοποιημένων προϊόντων, δραστηριοτήτων ή διεργασιών με σκοπό τη μείωση των απαιτούμενων πόρων και τον επιβλαβών εκπομπών [101].

Μια Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελείται από τα παρακάτω στάδια, όπως παρουσιάζονται και στην Εικόνα 44:

- 1. Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής.** Περιλαμβάνει περιγραφή του προϊόντος, της διαδικασίας ή της υπηρεσίας, δημιουργία του πλαισίου υπό το οποίο πρόκειται να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση και προσδιορισμό των ορίων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση.
- 2. Καταγραφή δεδομένων κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI).** Γίνεται προσδιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας, νερού και πρώτων υλών, όπως και των απορριμμάτων που διοχετεύονται στο περιβάλλον, όπως εκπομπές αερίων, λύματα, στερεά απόβλητα κλπ.
- 3. Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment, LCIA).** Γίνεται αξιολόγηση των επιδράσεων του συστήματος στο περιβάλλον.

4. **Ερμηνεία, ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.** Γίνεται ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, με στόχο την επιλογή του βέλτιστου προϊόντος, διαδικασίας ή υπηρεσίας που οδηγεί σε περιορισμό των επιδράσεων του συστήματος στο περιβάλλον [102].



Εικόνα 44: Μεθοδολογία εφαρμογής της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας [102].

Παρακάτω συνοψίζονται τα σπουδαιότερα από τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου [102]:

- Εκτιμά με συστηματικό τρόπο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του προϊόντος ή της υπηρεσίας, αξιολογώντας το σύστημα ολιστικά, από την αρχικές πρώτες ύλες μέχρι και την τελική του διάθεση για συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής.
- Απαιτεί χρόνο, καθώς το χρονικό πλαίσιο για την αξιολόγηση μπορεί να ποικίλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τον καθορισμένο στόχο και το πεδίο εφαρμογής.
- Στη μέθοδο τηρείται η εμπιστευτικότητα των δεδομένων σύμφωνα με την εκάστοτε εφαρμογή της, τα αποτελέσματα όμως πρέπει να γνωστοποιούνται στο ευρύ κοινό καθώς αποτελούν συγκριτικό ισχυρισμό.

- Είναι μια μέθοδος ανοιχτή σε νέα επιστημονικά δεδομένα και προτάσεις βελτίωσης.
- Δεν υπάρχει αυστηρή μεθοδολογία για τη διεξαγωγή της ανάλυσης κύκλου ζωής, καθώς διατηρείται η ευελιξία εφαρμογής της σύμφωνα με τους Διεθνείς Κανονισμούς και τις απαιτήσεις του οργανισμού που την διεξάγει.
- Η *LCA* διαφέρει από τις υπόλοιπες μεθόδους γιατί είναι μια σχετική προσέγγιση που βασίζεται σε μία λειτουργική μονάδα. Ωστόσο, δύναται να χρησιμοποιήσει στοιχεία από τις υπόλοιπες μεθόδους για τη διεξαγωγή της.
- Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής δεν υπολογίζει τις ακριβείς επιπτώσεις ενός συστήματος στο περιβάλλον, αλλά εξετάζει πιθανές επιπτώσεις για τους παρακάτω λόγους [102]:
 1. Εκφράζει ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της εξεταζόμενης μονάδας αναφοράς με σχετικά και όχι απόλυτα μεγέθη.
 2. Ενσωματώνει όλα τα περιβαλλοντικά δεδομένα στον παρόντα χώρο και χρόνο.
 3. Εμπεριέχει την εγγενή αβεβαιότητα που δημιουργείται κατά τη μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
 4. Οι εξεταζόμενες επιπτώσεις στο περιβάλλον αναφέρονται σε μελλοντικό χρόνο.

10.2. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΟΥ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Καθώς το μοντέλο της ανάλυσης κύκλου ζωής απλοποιεί την πραγματικότητα, η προσεκτική εφαρμογή του είναι απαραίτητη προκειμένου να μη μεταφερθεί πιθανή παραποίηση των γεγονότων κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Γι' αυτό, η ανάλυση εξ αρχής καθορίζει το σκοπό και το πεδίο εφαρμογής της. Η διαδικασία, περιλαμβάνει ως αρχή την περιγραφή του συστήματος, με πλήρη καθορισμό του εξεταζόμενου προϊόντος, τον κύκλο της ζωής του και τον κύκλο της λειτουργίας του. Στη συνέχεια περιγράφονται τα όρια του συστήματος και των λύσεων σε ενδεχόμενα προβλήματα κατανομής, και προσδιορίζεται η σχετική συνεισφορά του κάθε σταδίου της ανάλυσης. Καταγράφονται οι απαιτήσεις για την ποιότητα των δεδομένων, καθορίζεται ο λόγος πραγματοποίησης της υφιστάμενης ανάλυσης, το κοινό στο οποίο απευθύνεται και τα ερωτήματα που καλούνται να απαντηθούν. Τέλος,

προσδιορίζεται ο τύπος, η δομή και η μορφή των αποτελεσμάτων, όπως και η ακρίβεια που αναμένεται να έχουν τα αποτελέσματα προκειμένου να συμπεριληφθούν στην τελική ανάλυση. Καθορίζονται επίσης ο τρόπος ερμηνείας των αποτελεσμάτων, ώστε να επιβεβαιώνεται η χρησιμότητα τους και οι περιορισμοί που απαιτούνται. Τελικό βήμα του πρώτου σταδίου είναι η διερεύνηση της καταλληλότητας της *LCA* ως μεθόδου μελέτης για το υπό εξέταση θέμα.

Τα στοιχεία που καταγράφονται στο στάδιο του καθορισμού του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής δεν είναι στατικά, αλλά μπορεί να μεταβληθούν σε περίπτωση που χρειαστεί βελτιστοποίησης, είναι όμως απαραίτητα για την συνοχή της ανάλυσης. Κάθε απόφαση που λαμβάνεται στο πρώτο στάδιο αλληλοεπιδρά στη συνέχεια με τον τρόπο που θα διεξαχθεί η μελέτη και έχει αντίκτυπο στην συνάφεια των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, οι αποφάσεις που θα πρέπει να λαμβάνονται κατά την έναρξη της μελέτης αφορούν [103]:

1. Τον καθορισμό του στόχου.
2. Τον καθορισμό του είδους των πληροφοριών που θα συλλεχθούν με στόχο την διευκόλυνση της λήψης των αποφάσεων.
3. Τον καθορισμό της ποιότητας και λεπτομέρειας των πληροφοριών.
4. Τον καθορισμό της κατανομής των δεδομένων και τον τρόπο εξαγωγής των αποτελεσμάτων.
5. Τον ορισμό του πλαισίου εφαρμογής.
6. Τον προσδιορισμό των βασικών πρακτικών για την βέλτιστη εκτέλεση της μελέτης.

• Στόχος Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής

Πρωταρχικός στόχος μιας μελέτης *LCA* είναι η επιλογή του βέλτιστου προϊόντος, διαδικασίας ή υπηρεσίας με τις λιγότερες επιπτώσεις για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, ενώ παράλληλα μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη νέων προϊόντων, διεργασιών ή δραστηριοτήτων ώστε να προκύψει μείωση των απαιτούμενων πόρων και των παραγόμενων ρύπων [103]. Στόχος για την εκτέλεση μιας μελέτης *LCA* μπορεί επίσης να είναι η δημιουργία μιας βάσης πληροφοριών ενός ολοκληρωμένου συστήματος των διαδικασιών παραγωγής,

χρήσης και διάθεσης του προϊόντος, που θα λειτουργήσει ως σύστημα αναφοράς σε διαδικασίες βελτιστοποίησης.

Σε εφαρμογές της *LCA* στη βιομηχανία επιχειρείται λεπτομερής καταγραφή της ενέργειας, των πόρων και των παραγόμενων ρύπων σε κάθε βήμα των βιομηχανικών διαδικασιών, δίνοντας τη δυνατότητα βελτιστοποίησης όπου απαιτείται. Καθορίζονται οι διαδικασίες που αφορούν τη λήψη αποφάσεων για την πρόληψη της περιβαλλοντικής ρύπανσης, τη διατήρηση των εκμεταλλευόμενων πόρων (αειφορία) και τη δραστική μείωση των αποβλήτων. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μπορεί να επιφέρει καλύτερη κατανόηση των μειονεκτημάτων των διαφόρων μεθόδων, προϊόντων, υλικών και υπηρεσιών, και να ενισχύσει την αντίληψη ενός καλύτερα ενημερωμένου κοινού σε θέματα αποφάσεων που αφορούν υλικά και διαδικασίες παραγωγής, οδηγώντας έτσι σε πιο οικολογικές καταναλωτικές επιλογές.

- **Πεδίο εφαρμογής**

Ως πεδίο εφαρμογής ορίζεται το σύνολο των επιλογών, των περιορισμών και των παραδοχών της μεθόδου. Αυτές αφορούν:

- 1. Τη λειτουργία του προϊόντος, τη βάση σύγκρισης και τη ροή αναφοράς.** Καθώς η λειτουργία του προϊόντος είναι δύσκολο να προσδιορίζεται πάντα με ακρίβεια, ο καθορισμός μιας βάσης είναι πολύ σημαντικός για τη σύγκριση δύο προϊόντων. Σε περιπτώσεις που οι διαφορές ανάμεσα σε δύο προϊόντα είναι μεγάλες, η καταγραφή των χαρακτηριστικών λειτουργίας των προϊόντων δεν είναι εύκολη, όπως για παράδειγμα η σύγκριση μεταξύ ενός χάρτινου δοχείου γάλακτος μίας χρήσης, με ένα γυάλινο επαναχρησιμοποιούμενο δοχείο.
- 2. Τα αρχικά όρια του συστήματος.** Αν δεν είναι δυνατός ο καθορισμός του συνόλου των εισροών και εκροών του συστήματος, είναι απαραίτητος ο καθορισμός ορίων.
- 3. Τα κριτήρια επιλογής και κατανομής των δεδομένων και των αποτελεσμάτων.** Η σωστή επιλογή των δεδομένων εισόδου και εξόδου είναι κρίσιμη για την μελέτη του συστήματος, καθώς θα πρέπει να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα κριτήρια.

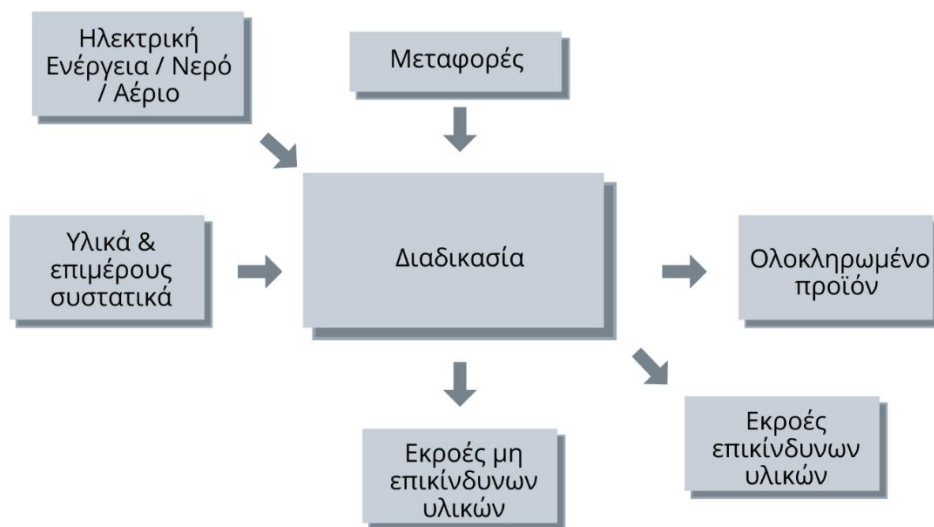
4. **Τις απαιτήσεις ποιότητας των δεδομένων.** Αναφέρονται στον τύπο των δεδομένων, τη συνοχή, τη πληρότητα και την επαναληψιμότητά τους.
5. **Την κατανομή.** Προτείνεται ο διαχωρισμός μιας διαδικασίας σε περισσότερες, με διαφορετικές εκροές ή επέκταση των προκαθορισμένων ορίων ή ακόμα κατανομή σύμφωνα με την κοινωνικοοικονομική βάση των συστημάτων, ώστε να χρησιμοποιούνται διαδικασίες με διαφορετικό στατιστικό βάρος, ισοδύναμες της αρχικής [104].

10.3. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE CYCLE INVENTORY, LCI)

Κατά τη διαδικασία απογραφής του συνόλου των δεδομένων, δημιουργείται η βάση αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των πιθανών αναγκαίων βελτιώσεων. Η ακρίβεια και η λεπτομέρεια των δεδομένων εισροής είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την πορεία της μελέτης. Η διαδικασία καταγραφής και οργάνωσης των δεδομένων αποτελείται από τέσσερα βήματα, όπως αναλύονται παρακάτω.

1. Διάγραμμα ροής

Το διάγραμμα ροής περιλαμβάνει το σύνολο των δεδομένων εισόδου και εξόδου του υπό εξέταση συστήματος, και σχηματίζει σε μία εικόνα ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διαδικασίας ή της υπηρεσίας. Πολυπλοκότερα διαγράμματα ροής σηματοδοτούν μεγαλύτερη ακρίβεια μελέτης, και αυξάνουν την χρηστικότητα των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση πολύπλοκου συστήματος, το κάθε βήμα θα πρέπει να αναλύεται σε μία σειρά υποσυστημάτων, με το κάθε υποσύστημα να αποτελεί «ένα μοναδικό βήμα ή μία διαδικασία που αποτελεί μέρος του συστήματος που έχει ήδη οριστεί» [103]. Σε κάθε υποσύστημα ορίζονται οι εισροές, που περιλαμβάνουν τις πρώτες ύλες και την απαιτούμενη ενέργεια, και οι εκροές, που περιλαμβάνουν τα ολοκληρωμένα προϊόντα, τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, τα υγρά και στερεά απόβλητα κ.ά. Επίσης, όλες οι μεταφορές από μία διαδικασία σε άλλη πρέπει να ποσοτικοποιούνται και να καταγράφεται η απόσταση και το μεταφερόμενο βάρος, με αναφορά του μεταφορικού μέσου. Στην Εικόνα 45 παρουσιάζεται η διάταξη μιας διαδικασίας και τα υποσυστήματά της:



Εικόνα 45. Τυπικό Διάγραμμα ροής διαδικασίας σε μια ανάλυση κύκλου ζωής [103].

2. Επιλογή των κατάλληλων δεδομένων

Προκειμένου να αποφευχθεί η συλλογή μεγάλης ποσότητας δεδομένων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιο έτοιμο πακέτο δεδομένων *LCA*, από εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό, με την προϋπόθεση να ικανοποιείται το απαιτούμενο επίπεδο για την ανάλυση των δεδομένων. Εναλλακτική μέθοδος συλλογής δεδομένων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου χρόνου καταγραφής και οργάνωσης, είναι η χρήση βάσης δεδομένων που συνήθως διατίθενται για την κατασκευή καταλόγου απογραφής.

3. Επανεξέταση του στόχου

Η επανεξέταση του στόχου στην προκειμένη περίπτωση καθίσταται απαραίτητη, προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητα των δεδομένων, καθώς κατά τη χρήση έτοιμων βάσεων δεδομένων και λογισμικών ανάλυσης απουσιάζει η καταγραφή των υποθέσεων και υπολογιστικών μεθόδων.

4. Αξιολόγηση και τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης

Κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων μιας ανάλυσης κύκλου ζωής, είναι σημαντική η λεπτομερής επεξήγηση της μεθοδολογίας, με ρητό καθορισμό των

υποσυστημάτων που αναλύθηκαν, των ορίων που τέθηκαν και των παραδοχών που έγιναν κατά την διαδικασία της μελέτης. Για την καλύτερη κατανόηση των ευρημάτων από τα αποτελέσματα της διαδικασίας, ο αναλυτής θα πρέπει να αναπτύξει μια παρουσίαση που θα περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα, τις εισροές και εκροές. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να επιλέγονται διαδικασίες κατάλληλες για την καλύτερη περιγραφή των αποτελεσμάτων χωρίς να υπεραπλουστεύονται.

10.4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT, LCIA)

Κατά την εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής εκτιμώνται οι πιθανές επιπτώσεις του προϊόντος, της διαδικασίας ή της υπηρεσίας στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία, δηλαδή των επιπτώσεων που μπορεί να επιφέρουν οι βλαβερές εκπομπές και η εξάντληση των πόρων. Στο στάδιο αυτό δημιουργείται μια σύνδεση του εξεταζόμενου προϊόντος ή υπηρεσίας και των ενδεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα βασικά στάδια εκτίμησης των επιπτώσεων της μελέτης περιλαμβάνουν:

1. Προσδιορισμό των κατηγοριών των επιπτώσεων. Γίνεται διαχωρισμός των επιπτώσεων σε κατηγορίες, για παράδειγμα υπερθέρμανση του πλανήτη, τοξικότητα υδάτινων πόρων κλπ.
2. Κατάταξη ή ταξινόμηση των επιπτώσεων σε επιμέρους κατηγορίες. Για παράδειγμα οι επιπτώσεις εκπομπών CO_2 στην υπερθέρμανση του πλανήτη ορίζονται ως μια κατηγορία.
3. Μοντελοποίηση των επιπτώσεων στις κατηγορίες με τη θέσπιση κατάλληλων συντελεστών μετατροπής.
4. Κανονικοποίηση των επιπτώσεων με σκοπό την ευκολότερη σύγκριση τους.
5. Ομαδοποίηση με βάση συγκεκριμένους δείκτες διαλογής.
6. Τελική αξιολόγηση και πραγματοποίηση παρουσίασης των πορισμάτων με στόχο την βέλτιστη κατανόηση των ευρημάτων.

10.5. ΕΡΜΗΝΕΙΑ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η ερμηνεία των πορισμάτων που προκύπτουν από την *LCA* είναι μια συστηματική διαδικασία που α) εντοπίζει, β) ελέγχει τις προϋποθέσεις που τίθενται και γ) αξιολογεί τα συμπεράσματα με βάση τα πορίσματα της ανάλυσης. Κατά τον προσδιορισμό των στόχων και πεδίου της μελέτης καθορίζονται οι απαιτήσεις βάσει των οποίων προκύπτουν τα πορίσματα της ανάλυσης.

Σύμφωνα με το πρότυπο *ISO 14044*, η διαδικασία είναι επαναληπτική μεταξύ των διαφόρων σταδίων ανάλυσης και προσδιορίζει τις διατάξεις που επιτρέπουν τη σύνδεση της ανάλυσης του κύκλου ζωής με άλλες μεθόδους περιβαλλοντικής διαχείρισης [104].

Οι πρώτες εφαρμογές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στη ναυτιλία έγιναν κατά τη δεκαετία του 1990. Οι μελέτες αυτές έδειξαν πως η μέθοδος *LCA* μπορεί να εφαρμοστεί για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού κύκλου ζωής των πλοίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αυτής της μεθόδου ανάλυσης είναι μια αξιολόγηση κύκλου ζωής υπό την μορφή ελέγχου (που αποτελεί μια απλούστευση της μεθόδου *LCA*) που έγινε για ένα επιβατηγό πλοίο [105].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Για την ουσιαστική μετάβαση σε μια «πράσινη ναυτιλία» απαιτούνται επενδύσεις τόσο για την έρευνα όσο και για την εγκατάσταση του εξοπλισμού των υπαρχόντων πλοίων. Στόχος είναι να βρεθούν και να εφαρμοστούν εμπορικά βιώσιμες λύσεις σε μια πληθώρα θεμάτων που προκύπτουν είτε κατά τη ναυπήγηση νέων πλοίων είτε κατά τη μετασκευή υπαρχόντων. Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο μισό θα απαιτήσει πολλές διαφορετικές τροποποιήσεις στις λειτουργίες του πλοίου, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης εναλλακτικών «πράσινων» καυσίμων, της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, και της μείωσης της παγκόσμιας μεταφορικής ζήτησης.

Η λειτουργία των Συστημάτων Καθαρισμού Καυσαερίων (*EGCS / Scrubbers*) κατά τη χρήση συμβατικών πετρελαϊκών καυσίμων έχει συνεισφέρει ουσιαστικά στα κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς η χρήση τους παρέχει τη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών οξειδίων του θείου SO_x σε ποσοστό τουλάχιστον 95% και την εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων *PM* στην ατμόσφαιρα κατά τουλάχιστον 60%. Τα scrubbers μπορούν ακόμα να περιορίσουν την εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO_x . Τα *EGCS* έχουν τη δυνατότητα να συνεισφέρουν στη γενική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ως ένα βαθμό. Ένα επιπλέον σημείο που θα πρέπει να διερευνηθεί είναι η ανάλυση κύκλου ζωής του *EGCS*, και η διαχείριση του συστήματος κατά το τέλος της ζωής του, όπως και διερεύνηση της διαδικασίας παραγωγής του, καθώς ενδέχεται να είναι ενεργειακά μη βιώσιμη.

Στο χώρο της ναυτιλίας έχουν γίνει στο παρελθόν σημαντικές αλλαγές που αφορούν το βασικό καύσιμο. Στη δεκαετία του 1920, σημειώθηκε αλλαγή από τη χρήση κάρβουνου σε μαζούτ (*HFO*) και τη δεκαετία του 1950 από μαζούτ σε ντίζελ (*MDO*) [106]. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (*LNG*) μπορεί να αντικαταστήσει τα υγρά πετρελαϊκά καύσιμα, καθώς έχει σημαντικά μικρότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον, με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα να αποτελούν το κύριο πρόβλημα. Εναλλακτικές επιλογές αποτελούν τα βιοκαύσιμα, η μεθανόλη, το υδρογόνο, η ηλεκτρική ενέργεια και η πυρηνική ενέργεια.

Τα οφέλη από τη χρήση κυψελών καυσίμου εστιάζονται στις χαμηλές (σχεδόν μηδενικές) εκπομπές ρύπων, την υψηλή τους απόδοση, την υψηλή αξιοπιστία της χρήσης τους και την ευελιξία ως προς το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιούν. Επίσης, προσφέρουν ενεργειακή

ασφάλεια και αθόρυβη λειτουργία. Το πλήθος των υφιστάμενων εφαρμογών τους και η συνεχής αναζήτηση για τη βελτίωση των συστημάτων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου δείχνουν πως οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου θα εφαρμοστούν εκτενώς σε συστήματα πρόωσης συνεισφέροντας σε ένα «πράσινο» και βιώσιμο μέλλον.

Τα συστήματα αιολικής πρόωσης αποτελούν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική επιλογή στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου στη ναυτιλία και στον περιορισμό εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, η ανάλυση που απαιτείται για την κατασκευή και λειτουργία των συστημάτων αιολικής πρόωσης αποτελεί μια πρόκληση καθώς απαιτείται συνδυασμός διάφορων επιστημονικών, και άλλων, κλάδων, όπως η φυσική, η ναυπηγική, η μετεωρολογία και γνώσεις σχετικά με την εφοδιαστική αλυσίδα, το εμπόριο, την στατιστική και τα οικονομικά. Στην παρούσα εργασία έγινε μια αναφορά στις υφιστάμενες τεχνολογίες αιολικής πρόωσης. Εκτιμάται ότι επίσης θα ήταν χρήσιμη οποιαδήποτε οικονομοτεχνική ανάλυση μιας επένδυσης τοποθέτησης συστημάτων αιολικής πρόωσης.

Οι ανεμογεννήτριες (*wind turbines*), σε σύγκριση με τα σταθερά ιστία (*wing sails*), μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην πρόωση του πλοίου μόνον όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι υπερδιπλάσια από την απαιτούμενη ταχύτητα κίνησης του πλοίου. Σε αντίθεση με το παραπάνω, τα σταθερά ιστία είναι σε θέση να προσδώσουν ένα ποσοστό πρόωσης στο πλοίο εφόσον επικρατούν κατάλληλες καιρικές συνθήκες, ανεξαρτήτως των υφιστάμενων ταχυτήτων πλοίου και ανέμου, όπως συμβαίνει με τα παραδοσιακά μαλακά ιστία.

Σύμφωνα με έρευνα των Nyanya *et al.* [79], στην περίπτωση *handysize bulk carrier* που χρησιμοποιεί συνδυαστικό σύστημα ιστίων (για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας) και φωτοβολταϊκών πάνελ (για την αξιοποίηση της ηλιακή ακτινοβολίας) έχει παρατηρηθεί ταυτόχρονη μείωση στις εκπομπές αέριων ρύπων και στα λειτουργικά του έξοδα. Στην ίδια έρευνα αναφέρεται πως το πλοίο μπορεί να ταξιδεύει αποκλειστικά με χρήση των συστημάτων αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εάν η ταχύτητα του μειωθεί στο 56% της ταχύτητας που έχει σχεδιασθεί να πλέει.

Η βιορύπανση (*biofouling*) αποτελεί πρόβλημα για τις θαλάσσιες μεταφορές από τα αρχαία χρόνια. Η χρήση των παραδοσιακών υφαλοχρωμάτων απαγορεύτηκε από το 2003 λόγω της τοξικότητας ορισμένων συστατικών αυτών. Συνεπώς, κρίνεται επιτακτική ανάγκη η

ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την αντιμετώπιση της βιορύπανσης. Αντλώντας έμπνευση από τη φύση, έχουν σχεδιαστεί υφαλοχρώματα υψηλής απόδοσης, που είναι ταυτόχρονα φιλικά προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτικά.

Καθώς οι μέθοδοι αερολίπανσης με συστήματα πεπιεσμένου αέρα έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν στη μείωση της αντίστασης τριβής, ο συνδυασμός τους με κοιλότητες αέρα στον πυθμένα του πλοίου έχει καλύτερα αποτελέσματα. Ο σχεδιασμός και το μέγεθος της γάστρας αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες για τον τύπο των κοιλοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βέλτιστα αποτελέσματα. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης των κοιλοτήτων αέρα που μπορεί να εξεταστεί περαιτέρω είναι η χρήση του ως σύστημα έκτακτης ανάγκης: η απότομη απελευθέρωση αέρα από ειδικά σχεδιασμένες βαλβίδες αέρα στις κοιλότητες της γάστρας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σύστημα πέδησης σε περίπτωση κινδύνου.

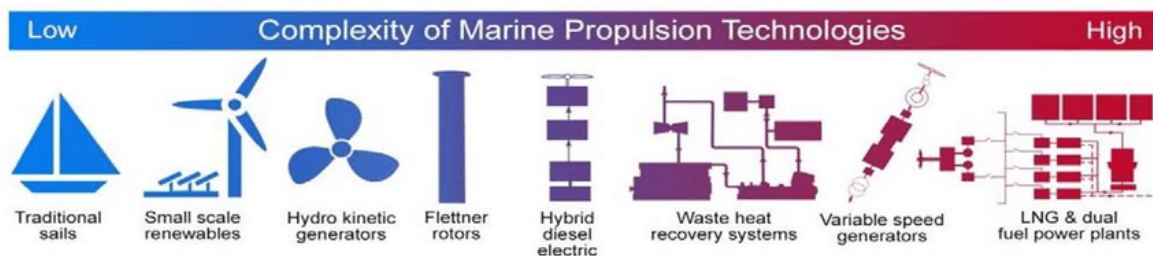
Οι μελέτες *LCA* βοηθούν στην ανάπτυξη νέων προϊόντων, διεργασιών ή δραστηριοτήτων, για την βελτιστοποίηση των απαιτούμενων πόρων και τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Οι βελτιωτικές αλλαγές που προκύπτουν από μια μελέτη *LCA* αφορούν την κατασκευαστική, εφοδιαστική και λειτουργική αλυσίδα του πλοίου, προσφέροντας μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στον κλάδο στο σύνολο του. Επιπλέον, αποτελούν ένα εργαλείο ελέγχου για την εφαρμογή των κατάλληλων κανονισμών όπως απαιτούνται από τις διεθνείς απαιτήσεις για την προστασία του περιβάλλοντος.

Οι παγκόσμιες απαιτήσεις για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση των εκπομπών ρύπων για την προστασία του περιβάλλοντος, έχουν ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμων από τα πλοία. Η βελτιστοποίηση της πλεύσης και της ταχύτητας μπορεί να γίνει δυνατή με την τοποθέτηση διαφόρων νέων τεχνολογικών συστημάτων στη γάστρα και την έλικα του πλοίου. Σκοπός είναι η επίτευξη της αύξησης της ταχύτητας πλεύσης, χωρίς περαιτέρω αύξηση της ισχύος πρόωσης, μειώνοντας το αποτύπωμα άνθρακα του πλοίου και τις εκπομπές αέριων ρύπων.

Συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να επιφέρουν επαύξηση ταχύτητας είναι τα συστήματα ρύθμισης της ροής των απόνερων, όπως οι δακτύλιοι εξισορρόπησης ροής και τα πτερύγια κεφαλής έλικας. Ακόμα, ο σχεδιασμός και η τοποθέτηση νέων βελτιωμένων

ελίκων αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά στην αποδοτικότητα της πρόωσης του πλοίου. Από τα ESDs ανακτάται χαμένη ενέργεια μέσω της έλικας του πλοίου, μειώνεται το φορτίο της έλικας, και διαλύονται οι δίνες που έπονται της έλικας καθώς η ροή στροβιλίζεται σε αντίθετη κατεύθυνση από την περιστροφή της έλικας.

Στην εικόνα 46 παρουσιάζονται εναλλακτικές τεχνολογίες πρόωσης κατά σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας που μπορούν να εφαρμοστούν στην ναυτιλία. Η εφαρμογή τους έχει στόχο την δημιουργία μιας «πράσινης» ναυτιλίας, δηλαδή μιας βιομηχανίας φιλικής προς το περιβάλλον.



Εικόνα 46. Οι ναυτικές τεχνολογίες πρόωσης κατά σειρά αυξανόμενης πολυπλοκότητας.

Όλες οι τεχνολογικές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν όπως προτείνονται στην παρούσα εργασία απαιτούν μια περίοδο ωρίμανσης μέχρι τελικώς να υιοθετηθούν από τους εμπλεκόμενους φορείς. Στους εμπλεκόμενους φορείς περιλαμβάνεται η ναυπηγική βιομηχανία, οι πλοιοκτήτες, οι ναυλωτές, οι κατασκευαστές εξοπλισμού, οι παραγωγοί και οι διανομείς των καυσίμων, οι μεταφορείς και οι λιμενικές υποδομές, καθώς και οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων και ελέγχου σε παγκόσμιο επίπεδο. Η πορεία για την εξασφάλιση τεχνολογικά και λειτουργικά αξιόπιστων και συμφερούσων λύσεων προϋποθέτει τη δοκιμή των προτάσεων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η επίτευξη των επιβεβλημένων και φιλόδοξων στόχων για τη δραστική μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλίας αποτελεί μια πρόκληση για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Όμως, η επιτυχία αυτής της συνολικής αλλαγής στη ναυτιλιακή κοινότητα είναι εξίσου σημαντική και για την προστασία του περιβάλλοντος.

ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

1. United Nations Conference on Trade and Development, *Unctad Statistics*, [no date], [Online]. Available from: <https://unctadstat.unctad.org/wds/TableView/tableView.aspx?ReportId=80100>. [Accessed 1 February 2022].
2. G. Roberts, *Fleet Value for Top 10 Shipowning Nations (2022)*, *Infomaritime*, 20 March 2022. [Online]. Available from: <http://infomaritime.eu/index.php/2021/08/22/top-15-shipowning-countries/>. [Accessed 11 August 2022].
3. P. Balcombe, J. Brierley, C. Lewis, L. Skatvedt, J. Speirs, A. Hawkes και I. Staffell, *How to decarbonise international shipping: options for fuels, technologies and policies.*, *Energy Conversion and Management*, 2019.
4. International Maritime Organization, *Fourth IMO GHG Study 2020 Executive Summary*, London, 2021.
5. Oceana Europe, *OCEANA: Protecting World's Oceans*, 2021. [Online]. Available from: <https://europe.oceana.org/shipping-pollution-1/>. [Accessed 6 January 2022].
6. Marine Environment Protection Committee, *RESOLUTION MEPC.176(58): Amendments to the annex of the Protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto (Revised MARPOL Annex VI)*, MEPC, London, 2008.
7. World Health Organization, *World Health Organization: Ambient (Outdoor) Air Pollution*, 22 September 2021. [Online]. Available from: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed 17 March 2022].
8. European Environment Agency (EEA), *Air Pollution Due to Ozone: Health Impacts and Effects of Climate Change*, 2015, [Online]. Available from: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/air-pollution-by-ozone-2>. [Accessed 19 March 2022].
9. World Health Organization, *Global Health Risks: Mortality and Burden of Disease Attributable to Selected Major Risks*, World Health Organization, Geneva, 2009.
10. World Health Organization, *Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution: REVIHAAP Project*, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 2013.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth*, Cambridge, 2021.
12. United Nations, *General Assembly, 23rd session, official records, 3rd Committee, 1558th meeting*, held on Thursday, 3 October 1968, New York, 3 October 1968. [Online]. Available from: <https://digitallibrary.un.org/record/806989>. [Accessed 2023 01 22].

13. International Maritime Organization, *International Conference on Marine Pollution, 1973 (MP/CONF)*, 2 November 1973. [Online]. Available from: https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/Pages/MP_CONF_1973-Default.aspx. [Assessed 22 January 2023].
14. International Maritime Organization, *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*, 1997. [Online]. Available from: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx). [Assessed 22 January 2023].
15. International Maritime Organization, *RESOLUTION MEPC.177(58), Amendments to the Technical Code on Control Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines (NOx Technical Code 2008)*, 10 October 2008. [Online]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177\(58\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177(58).pdf). [Assessed 22 January 2023].
16. DNV, *Alternative fuels: the options*, 10 October 2018. [Online]. Available from: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/alternative-fuels.html>. [Assessed 22 January 2023].
17. International Maritime Organization, *Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM) – Regulation 14*, October 2016. [Online]. Available from: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx). [Assessed 03 October 2022].
18. International Maritime Organization, *Nitrogen oxides (NOx) – Regulation 13. Air Pollution*, 2013. [Online]. Available from: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-\T1\textendash-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-\T1\textendash-Regulation-13.aspx). [Assessed 22 January 2023].
19. International Maritime Organization, *RESOLUTION MEPC.328(76)*, 1 November 2022. [Online]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/Certified%20copy%20of%20MEPC.328\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/Certified%20copy%20of%20MEPC.328(76).pdf). [Assessed 22 January 2023].
20. International Maritime Organization, *MEPC.1/Circ.778/Rev.3: List of Special Areas, Emission Control Areas*, London, 2018.
21. International Maritime Organization, *RESOLUTION MEPC.308(73) - 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships*, 26 October 2018. [Online]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf). [Assessed 23 January 2023].

22. J. Zheng, H. Hu και L. Dai, *How would EEDI influence Chinese shipbuilding industry.*, *Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research*, τόμ. 40:5, pp. 495-510, 2013.
23. L. R. & D. GL, *Project Final Report: Assessment of IMO Mandated Energy Efficiency Measures for International Shipping*, 31 October 2011. [Online]. Available from: https://www.schonescheepvaart.nl/downloads/rapporten/doc_1362490668.pdf. [Assessed 22 January 2023].
24. International Maritime Organization, *Marine Environment Protection Committee (MEPC) 75*, 16-20 November (virtual session), November 2022. [Online]. Available from: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-75th-session.aspx>. [Assessed 22 January 2023].
25. DNV, *EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index : Calculation*, 17 November 2021. [Online]. Available from: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/calculation.html>. [Assessed 23 January 2023]
26. NIPPON KAIJI KYOKAI (Class NK), *Outlines of EEXI regulation*, 2021 [Online], Available from: https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/eexi/eexi_rev3e.pdf. [assessed 23 January 2023].
27. International Maritime Organization, *Resolution MEPC.346(78) - 2022 Guidelines for the development of a ship energy efficiency*, 10 June 2022. [Online]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.346\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.346(78).pdf). [Assessed 23 January 2023].
28. International Maritime Organization, *Resolution MEPC.336(76)*, 17 June 2021. [Online]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.336\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.336(76).pdf). [Assessed 23 January 2023].
29. DNV, *Carbon Intensity index*, 2003. [Online]. Available from: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/answers-to-frequent-questions.html>. [Assessed 22 January 2023].
30. International Maritime Organization, *Resolution MEPC.352(78)*, 10 June 2022. [Online]. Available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.352\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.352(78).pdf). [Assessed 23 January 2023].
31. DNV, *CII – Carbon Intensity Indicator*, [no date] [Online]. Available from: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/answers-to-frequent-questions.html>. [Assessed 23 January 2023].

32. Wartsila, *Poseidon Principles*, [no date] [Online]. Available from: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/poseidon-principles>. [Assessed 23 January 2023].
33. Wartsila, *Annual Efficiency Ratio (AER)*, [no date] [Online]. Available from: [https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/annual-efficiency-ratio-\(aer\)](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/annual-efficiency-ratio-(aer)). [Assessed 23 January 2023].
34. International Maritime Organization, *Marine Environment Protection Committee (MEPC 76)*, 10 to 17 June 2021 (remote session), 17 June 2021. [Online]. Available from: [https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC76meetingsummary.aspx#:~:text=current%20IMO%20publications-,Marine%20Environment%20Protection%20Committee%20\(MEPC%2076\)%2C%2010%20to,17%20June%202021%20\(remote%20session\)&text=T](https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC76meetingsummary.aspx#:~:text=current%20IMO%20publications-,Marine%20Environment%20Protection%20Committee%20(MEPC%2076)%2C%2010%20to,17%20June%202021%20(remote%20session)&text=T). [Assessed 23 January 2023].
35. R. McGill, W. Remley, K. Winther, *Alternative Fuels for Marine Applications: A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement*, Argonne National Laboratory, Argonne, 2013.
36. Marquard & Bahls, *Λεξικό όρων*, [no date] [Online]. Available from: <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-diesel-oil-mdo-intermediate-fuel-oil-ifo.html>. [Assessed 23 January 2023]
37. Marquard & Bahls, *Marquard-bahls Λεξικό όρων*, [no date] [Online]. Available from: <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-gasoil-mgo.html>. [Assessed 23 January 2023]
38. Chevron, *Everything you need to know about marine fuels*, 2021 [Online]. Available from: https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/fuels-brochure/Chevron_Everything%20You%20Need%20To%20Know%20About%20Marine%20Fuels_v8-21_DESKTOP.pdf [Assessed 23 January 2023]
39. Ship & Bunker, *Ship and bunker - Rotterdam Bunker Prices-ULSFO*, 2022. [Online]. Available from: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#ULSFO>. [Assessed 12 December 2022]
40. D. N. Kuimov, M. S. Minkin, A. D. Lukyanov, *Low-Sulfur Fuel and Oil Production.*, *Materials Science Forum*, 2016.
41. T. W. P. Smith, J. P. Jalkanen, B. A. Anderson, J. J. Corbett, J. Faber, S. Hanayama, E. O'Keeffe, S. Parker, L. Johansson, L. Aldous, C. Raucci, M. Traut, S. Ettinger, D. Nelissen, D. Lee, S. Ng, A. Agrawal, J. Winebrake, M. Hoen, *Third IMO GHG Study 2014, Executive Summary and Final Report*, International Maritime Organization, London, 2015.
42. F. Burel, R. Tacconi, N. Zuliani, *Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion*, Elsevier, 2013.

43. Γ. Λαϊάκης, *Χρήση εναλλακτικών καυσίμων και πηγών ενέργειας στη ναυτιλία: Οικονομική και περιβαλλοντική διάσταση*, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο - Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Πάτρα, 2019.
44. C. H. Chia-wen, F. Claus, *Biofuels for the marine shipping sector*, IEA Bioenergy, Copenhagen, 2017.
45. E4tech (UK) Ltd, *Master plan for CO2 reduction in the Dutch shipping sector - Biofuels for shipping*, UK, 2018.
46. Ea Energy Analyses, *Fuel costs – Production, distribution and infrastructure costs used in the Economic Analysis in Grøn Roadmap 2030*, 2015.
47. P. Jurrit Bergsma (TNO), *Final Report: Assessment of alternative fuels for seagoing vessels using Heavy Fuel Oil.*, Maritime Knowledge Centre, TNO and TU Delft, Netherlands, 2019.
48. O. A. Russo et al, *State of the art of biofuels from pure plant oil*, Elsevier, 2012.
49. U. Einemo, *ibia.net - What's new and why*, 24 March 2017. [Online]. Available: <https://ibia.net/2017/03/24/iso-82172017-whats-new-and-why/#:~:text=There%20are%20several%20significant%20changes,to%20allow%20for%20inclusion%20of.> [Assessed 12 December 2022]
50. C. M. Noor, M. Noor, R. Mamat, *Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review*, Malaysia, Elsevier Ltd, 2018.
51. DNV GL - SEA\LNG Ltd, *Comparison of Alternative Marine Fuels*, DNV GL, Norway, 2019.
52. K. Andreas, *Methanol as marine fuel – challenges and opportunities*, University of West Attica School of Engineering Department of Naval Architecture, Egaleo, 2021.
53. U. Turaga, *Gas Processing & LNG*, [no date] [Online]. Available from: <http://www.gasprocessingnews.com/features/201510/small-scale-methanol-technologies-offer-flexibility,-cost-effectiveness.aspx>. [Assessed 02 May 2022].
54. Β. Θεόδωρος, *Συγκριτική Τεχνοοικονομική Ανάλυση Μεθόδων Παραγωγής Μεθανόλης*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2020.
55. Μ. Πολίτη-Κατσαδώρου, *Η επενδυτική βιωσιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων στη ναυτιλία.*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου & Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αθήνα, 2021.
56. Κ. Τουλίκας, *Τεχνο-οικονομική και περιβαλλοντική μελέτη της χρήσης αμμωνίας (NH3) στη ναυτιλία ως εναλλακτικό καύσιμο*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2022.
57. Α. Μπακαλάρης, *Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου στη Ναυτιλία - Προοπτικές για Μεγάλης Ισχύος Μονάδες*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2019.
58. Jingang Han et al., *State of the Art of Fuel Cells for Ship Applications*, Industrial Electronics (ISIE), China, 2012.

59. S. Krummricha *et al.*, *Diesel fuel processing for fuel cells – DESIRE.*, *Journal of Power Sources*, vol. 160, no. 1, pp. 500-504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.100>, 2006.
60. E4ships, *Maritime Shipping: SchiBZ2* [no date] [Online]. Available from: <https://www.e4ships.de/english/maritime-shipping/schibz2/>. [Accessed 29 Nov 2022].
61. T. A. Tran, *Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships.*, *Journal of Marine Science: Reseach & Development*, 2017.
62. Lloyd’s Register, *Understanding exhaust gas treatment systems: Guidance for shipowners and operators.*, London, United Kingdom, 2012, [Online]. Available from: https://www.rtu.lv/writable/public_files/RTU_understanding_exhaust_gas_treatment_systems.pdf. [Accessed 18 February 2023].
63. BOAT International, *Maltese Falcon*, *Boat International Media Ltd*, 2008. [Online]. Available from: <https://www.boatinternational.com/yachts/the-superyacht-directory/maltese-falcon--41261>. [Accessed 23 April 2022]
64. Magma Structures BP, *The Dynarig: Efficient, safe and high-performance sailing system for tomorrow's sailing superyachts.*, Hampshire: Magma Structures BP, 2014.
65. P. Nuttall, J. Kaitu’u, *The Magnus Effect and the Flettner Rotor: Potential Application for Future Oceanic Shipping*, vol. 36, no. 2, pp. 161-182, 2016.
66. Ναυτικά Χρονικά | Gratia Publications, *Περιστρεφόμενα κυλινδρικά ιστία τοποθετήθηκαν σε πλοίο της Maersk Tankers*, 01 September 2018. [Online]. Available from: <https://www.naftikachronika.gr/2018/09/01/peristrefomena-kylindrika-estia-topothetithikan-se-ploio-tis-maersk-tankers/>. [Accessed 11 June 2022].
67. Anemoi Marine Technologies Ltd, *ANEMOI - m/v Afros: The world’s first Rotor Sail bulk carrier, operating at >99% availability*, 2020. [Online]. Available from: <https://anemoimarine.com/afros-rotor-sail-bulk-carrier/>. [Assessed 18 February 2023].
68. Ναυτικά Χρονικά, Gratia Publications, *Rotor Sails σε ένα ακόμα φορτηγό πλοίο*, 29 May 2021. [Online]. Available from: <https://www.naftikachronika.gr/2021/05/29/rotor-sails-se-ena-akoma-fortigo-ploio/>. [Accessed 11 June 2022].
69. Anemoi Marine Technologies Ltd., *ANEMOI - TR Lady: Kamsarmax bulk carrier to receive 3 Rotor Sails*, 2021. [Online]. Available from: <https://anemoimarine.com/kamsarmax-rotor-sails-tr-lady>. [Accessed 18 February 2023].
70. G. Bordogna, *Aerodynamics of Wind-assisted Ships*, Delft University of Technology, Como, Italy, 2020.
71. Econowind, *Flatrack Ventifoil Unit* [no date], Econowind, [Online]. Available from: <https://www.econowind.nl/index.php/flatrack-ventifoil-unit/>. [Accessed 25 June 2022].

72. D. A. Vrijdag, P. J.-W. v. Wingerden, D. C. Thill, *Wind turbines as inspiration for ships*. [no date], Delft University of Technology, [Online]. Available from: <https://www.tudelft.nl/en/2018/3me/april/wind-turbines-as-inspiration-for-ships>. [Accessed 15 June 2022].
73. D. G. Díaz, *Study and analysis of the use of wind power for the propulsion of merchant vessels*, Facultat de Nàutica de Barcelona, Barcelona, 2020.
74. B. L. Blackford, *Optimal Blade Design for Windmill Boat and Vehicles*, Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, Canada, 1985.
75. S. Steen, E. Bøckmann, *Wind Turbine Propulsion of Ships*, Second International Symposium on Marine Propulsors, Hamburg, Germany, 2011.
76. Lade AS, *Lade AS: Vindskip* [no date] [Online]. Available from: <https://ladeas.no/>. [Accessed 06 June 2022].
77. R. Tang *et al.*, *Suppression strategy of short-term and long-term environmental disturbances for maritime photovoltaic system*, pp. 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114183>, 2019.
78. Hiteshk, *Auriga Leader – The World’s First Partially Propelled Cargo Ship*, *Marine Insight*, 28 December 2012. [Online]. Available from: <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/auriga-leader-the-worlds-first-partially-propelled-cargo-ship/#:~:text=Auriga%20Leader%2C%20a%20RoRo%20Ship,construct%20the%20ultimate%20green%20ships>. [Accessed 07 June 2022].
79. A. Nyanya, Mphatso N. *et al.*, *Wind and solar assisted ship propulsion optimisation and its application to a bulk carrier*, pp. 2213-1388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101397>, 2021.
80. J. M. Bodell, C. T. Chiriboga, *Techno-economic analysis of the Local System Operator concept in a multi-dwelling unit in Sweden*, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2018.
81. Zhang Yiping *et al.*, *A wave foil with passive angle of attack adjustment for wave energy extraction for ships*, *Ocean Engineering*, pp. 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110627>, 2022.
82. Jin Huichao *et al.*, *Bioinspired marine antifouling coatings: Status, prospects, and future*, *Progress in Materials Science*, vol. 124, no. 100889, pp. 0079-6425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100889>, 2021.
83. Γ. Μπατσαούρας, *Συντήρηση υφάλων πλοίων: Αντιρρυπαντική τεχνολογία, υφαλοχρωματισμοί, υποβρύχιοι καθαρισμοί και η απόδοση πλοίου.*, ΔΠΜΣ Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία, Πειραιάς, 2022.

84. M. L. Christine Bressy, *Marine Fouling : An Overview - Development of environmentally friendly marine coatings.*, *Journal of Ocean Technology*, 2014.
85. F. Azemar et al., *Development of hybrid antifouling paints.*, *Progress in Organic Coatings*, 1/287, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.04.007>, 2015.
86. Y. Qi et al., *Antifouling and antibacterial compounds from the gorgonians *Subergorgia suberosa* and *Scripearia gracillis*.*, *Natural Product Research*, vol. 22, no. 2, pp. 154-166. DOI: 10.1080/14786410701642441, 2008.
87. M. Sørensen, K. Flugt et al., *ActiGuard®: Novel technology to improve long-term performance of silicone-based Fouling Defence coatings.*
88. Q. Xie et al., *Dynamic surface antifouling: mechanism and systems.*, *Soft Matter*, vol. 15, no. 1, pp. 087-107, 2019.
89. L. Mäkiharju, Simo A. et al., *On the energy economics of air lubrication drag reduction.*, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 412-422. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0107>, 2012.
90. Wang Hanwen et al., *Drag reduction by gas lubrication with bubbles.*, *Ocean Engineering*, vol. 258, pp. 111-833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111833>, 2022.
91. M. L. LIU Min, *Drag reduction methods at solid–liquid interfaces.*, *Friction*, vol. 10, no. 4, pp. 491–515. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0502-8>, 2022.
92. T. Y. M. Y. Kumagai Ichiro, *Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships.*, *Ocean Engineering*, vol. 95, pp. 0029-8018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.019>, 2014.
93. M. Elbing et al., *Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction.*, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 612, pp. 201-236. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112008003029>, 2008.
94. Shiri Abolfazl et al., *Hydrodynamics of a Displacement Air Cavity Ship*, Gothenburg, Sweden, 2012.
95. MOL Techno-Trade Ltd., *PBCF (Propeller Boss Cap Fins) Development Story*, 23 April 2020. [Online]. Available from: <https://www.pbcf.jp/column/detail.php?id=70>. [Accessed 4 August 2022].
96. Α. Θυμαράς, *Περιγραφή και Διευρεύνηση Λειτουργίας Συσκευών Εξοικονόμησης Ενέργειας με Εφαρμογή στο Σύστημα Πρόωσης*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.
97. S. Aino, *Hydrodynamic study on a ducted propeller in a large vessel by time-accurate self-propulsion simulation with Reynolds-Averaged Navier-Stokes -equations*, Aalto University, Helsinki, 2014.

98. A. Moberg, *Environmental systems analysis tools for decision-making : LCA and Swedish waste management as an example*, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006.
99. N. Bahareh Reza *et al.*, *Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis.*, *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 2053-2066, April 2011.
100. G.Rebitzer, *Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications.*, *Environment International*, vol. 30, no. 5, pp. 701-720, 2004.
101. J. Guinee, *Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future.*, *Environmental Science & Technology*, vol. 45, p. 90–96, 2011.
102. L. Kun-Mo, I. Atsushi, *Life Cycle Assessment: Best Practices of ISO 14040 Series*, Korea: Asia-Pacific Economic Cooperation, 2004.
103. M. A. Curran, *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency, 2006.
104. International Organization for Standardization Technical Committee ISO/TC 207, *ISO 14044:2006(en) Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, ISO, 2006.
105. A. Miola *et al.*, *External costs of Transportation Case study: maritime transport*, European Communities, Luxembourg, 2009.