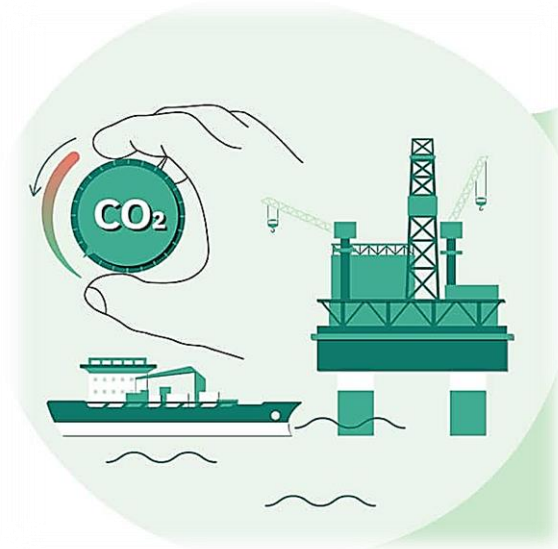




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης  
Διεργασιών και Συστημάτων



Αξιολόγηση προοπτικών και τεχνολογικής ωριμότητας  
για τη μείωση των εκπομπών στο χώρο της ναυτιλίας

Διπλωματική Εργασία  
Χριστόφορος Κορωναίος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
Αντώνης Κοκόσης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2024

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του ΕΜΠ κ. Αντώνη Κοκόση για την εμπιστοσύνη του και τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψη του. Δίχως την πολύτιμη καθοδήγησή του δεν θα τα είχα φέρει εις πέρας, ήταν τιμή μου που συνεργάστηκα μαζί του.

Τέλος, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια εκτενή έρευνα που στοχεύει στον εντοπισμό και την αξιολόγηση βιώσιμων λύσεων στη χρήση καυσίμων και τις τεχνολογικές εξελίξεις στη διεθνή ναυτιλιακή βιομηχανία. Ο πρωταρχικός σκοπός της είναι να αξιολογήσει πώς αυτές οι λύσεις μπορούν να μειώσουν αποτελεσματικά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) και να συμβάλουν στην βιωσιμότητα του περιβάλλοντος και στις παγκόσμιες ναυτιλιακές λειτουργίες.

Το πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζει μια εις βάθος ανάλυση της τρέχουσας χρήσης καυσίμων στη ναυτιλία και των σχετικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, εστιάζοντας στις εκπομπές από διάφορα στάδια του κύκλου ζωής του καυσίμου. Περιγράφει επίσης τις ρυθμιστικές στρατηγικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μείωση των εκπομπών στον ναυτιλιακό τομέα, τονίζοντας τη σημασία μιας συνολικής προσέγγισης για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής αερίων θερμοκηπίου των καυσίμων των πλοίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται εναλλακτικά καύσιμα όπως το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG), η μεθανόλη και το υδρογόνο. Αυτή η ενότητα αξιολογεί τις διαδικασίες παραγωγής τους, τις σχετικές εκπομπές, την πρακτική εφαρμογή στη ναυτιλιακή χρήση και τις προκλήσεις υποδομής που θέτουν. Παραθέτει επίσης τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς κάθε τύπου καυσίμου, παρέχοντας μια ισορροπημένη εικόνα της σκοπιμότητάς τους για τη ναυτιλία.

Το τρίτο κεφάλαιο διερευνά τον αντίκτυπο των τεχνολογιών σχεδιασμού, υλικών, λίπανσης και επίστρωσης του πλοίου στη βελτίωση της απόδοσής του και στη μείωση των σχετικών εκπομπών. Υπογραμμίζεται η σημαντική συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους του πλοίου, της μείωσης των εκπομπών και των τεχνολογικών εξελίξεων που μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοσή του.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής και της αιολικής ενέργειας, βρίσκονται στο επίκεντρο του τέταρτου κεφαλαίου. Αυτή η ενότητα αξιολογεί τις τρέχουσες εφαρμογές τους στη ναυτιλία, τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν και τις δυνατότητες των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων. Ερευνά επίσης, τη χρήση κυψελών καυσίμου στη θαλάσσια πρόωση, περιγράφοντας τις κρίσιμες τεχνολογίες, τις μελλοντικές προοπτικές και τις εφαρμογές τους στον «πραγματικό κόσμο» (real-world applications).

Το τελευταίο κεφάλαιο εμβαθύνει στην ψηφιοποίηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας, διερευνώντας την ενοποίηση και τις προκλήσεις του AI, ML και blockchain στις ναυτιλιακές υπηρεσίες και αλυσίδες εφοδιασμού. Παρουσιάζει τεχνολογίες αιχμής και πρωτοποριακά έργα στην αυτόνομη ναυτιλία, τονίζοντας το μετασχηματιστικό αντίκτυπό τους στον κλάδο.

Συμπερασματικά, η εργασία αυτή υποστηρίζει ότι έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη βιώσιμων καυσίμων και τεχνολογιών στη ναυτιλία, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν. Αυτές περιλαμβάνουν τεχνολογικούς περιορισμούς, απαιτήσεις υποδομής, ρυθμιστικά πλαίσια και την ανάγκη για παγκόσμια συνεργασία και τυποποίηση. Η εργασία υπογραμμίζει τη σημασία της συνεχούς καινοτομίας, της έρευνας και των συλλογικών προσπαθειών για την επίτευξη μιας πιο βιώσιμης και περιβαλλοντικά υπεύθυνης ναυτιλίας.

## Abstract

This diploma thesis is an extensive investigation aimed at identifying and evaluating sustainable solutions in fuel usage and technological advancements within the international maritime industry. Its primary purpose is to assess how these solutions can effectively reduce greenhouse gas (GHG) emissions and contribute to environmental sustainability in global shipping operations.

The first chapter offers an in-depth analysis of current maritime fuel usage and its associated GHG emissions, focusing on emissions from various stages of the fuel lifecycle. It also discusses the European Union's regulatory strategies for emission reduction in the maritime sector, emphasizing the importance of a comprehensive approach in assessing the GHG lifecycle of marine fuels.

In the second chapter, alternative fuels such as Liquefied Natural Gas (LNG), methanol, and hydrogen are examined. This section critically assesses their production processes, associated emissions, practicality in maritime usage, and the infrastructural challenges they pose. It also discusses the advantages and limitations of each fuel type, providing a balanced view of their feasibility for shipping.

The third chapter explores the impact of ship design, materials, lubrication, and coating technologies on improving vessel performance and reducing emissions. It highlights the significant correlation between ship size and emission reduction and the technological advancements that can optimize ship performance.

Renewable energy sources, including solar and wind energy, are the focus of the fourth chapter. This section evaluates their current applications in shipping, the challenges faced, and the potential of hybrid energy systems. It also delves into the use of fuel cells in maritime propulsion, outlining their critical technologies, future prospects, and real-world applications.

The final chapter delves into the digitization of the shipping industry, exploring the integration and challenges of AI, ML, and blockchain in maritime services and supply chains. It presents cutting-edge technologies and pioneering projects in autonomous shipping, emphasizing their transformative impact on the industry.

Conclusively, the thesis argues that while significant progress has been made in developing sustainable maritime fuels and technologies, there are still considerable challenges to overcome. These include technological limitations, infrastructural requirements, regulatory frameworks, and the need for global cooperation and standardization. The work underscores the importance of continued innovation, research, and collaborative efforts to achieve a more sustainable and environmentally responsible maritime industry.

## Περιεχόμενα

Πίνακας Εικόνων .....	10
Πίνακας Πινάκων.....	12
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>13</b>
<b>Τα καύσιμα στη διεθνή ναυτιλία-Πολιτικές μείωσης αερίων θερμοκηπίου</b> .....	<b>13</b>
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Τρέχουσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στη ναυτιλία.....	14
1.3 Εκπομπές από την Πηγή-στη-Δεξαμενή, από τη Δεξαμενή-στην-Κίνηση και από Πηγή-στην-Κίνηση .....	16
1.4 Μείωση εκπομπών στη ναυτιλία: Νέες κανονιστικές προσεγγίσεις της ΕΕ .....	17
1.5 Κατευθυντήριες γραμμές υπολογισμού GHG του κύκλου ζωής των καυσίμων πλοίων (Κατευθυντήριες οδηγίες LCA).....	19
1.6 Επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας .....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>24</b>
<b>Εναλλακτικά καύσιμα σε πλοία</b> .....	<b>24</b>
2.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) .....	24
2.1.1 Διαδικασία παραγωγής LNG .....	25
2.1.2 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην αλυσίδα LNG .....	27
2.1.3 Κατάσταση πρακτικής LNG ως καυσίμου σε πλοία.....	30
2.1.4 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις LNG ως καυσίμου σε πλοία.....	32
2.1.5 Υποδομές και εφοδιαστική αλυσίδα LNG.....	34
2.1.6 Πρόωση με LNG .....	39
2.1.7 Συστήματα πρόωσης με LNG .....	39
2.1.8 Χαρακτηριστικά παραδείγματα πλοίων με LNG .....	42
2.2 Μεθανόλη .....	45
2.2.1 Παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο. ....	46
2.2.2 Παραγωγή e-Μεθανόλης (e-methanol).....	50
2.2.3 Παραγωγή Βιο-μεθανόλης.....	51
2.2.4 Καύση μεθανόλης σε πλοία: Ανάλυση εκπομπών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις .....	54
2.2.5 Διαθεσιμότητα μεθανόλης .....	57
2.2.6 Υποδομές εφαρμογής Μεθανόλης σε Ναυτιλιακά καύσιμα .....	58
2.2.7 Χρήση μεθανόλης ως καυσίμου πλοίων – Υπάρχουσα κατάσταση .....	61
2.2.8 Χρήση Μεθανόλης σε Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης (ICE) .....	62
2.2.9 Χρήση Μεθανόλης σε Κυψέλες Καυσίμου .....	64
2.3 Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου .....	66

2.3.1 Παραγωγή υδρογόνου – Υπάρχουσα κατάσταση .....	67
2.3.2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) από την παραγωγή υδρογόνου .....	68
2.3.3 Διαθεσιμότητα υδρογόνου στην παγκόσμια ναυτιλία .....	71
2.3.4 Κινητήρες υδρογόνου.....	73
2.3.5 Μηχανές εσωτερικής καύσης- Σχεδιασμός κινητήρα υδρογόνου .....	75
2.3.6 Προκλήσεις εφαρμογής του υδρογόνου ως καυσίμου στα πλοία .....	76
2.3.7 Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου – Εξέταση περίπτωσης .....	80
2.4 Παρατηρήσεις – Σχολιασμός.....	82
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	<b>85</b>
<b>Υλικά και Σχεδιασμός</b> .....	<b>85</b>
3.1 Ο ρόλος του σχεδιασμού, των υλικών, της λίπανσης και της επίστρωσης στη βελτιστοποίηση πλοίων .....	85
3.2 Ανάλυση σχέσης μεγέθους πλοίου και μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου .88	
3.2.1 Κατάσταση πρακτικής στο σχεδιασμό μεγέθους πλοίου .....	90
3.2.2 Τεχνολογίες βελτιστοποίησης μεγέθους πλοίων .....	92
3.2.3 Προκλήσεις σχετικές με το μέγεθος πλοίου ως παράγοντα μείωσης των GHG .....	94
3.2.4 Εκτίμηση TRL σε σχέση με τις τεχνολογίες μεγέθους πλοίου.....	97
3.3 Αέρια Λίπανση (Air Lubrication) .....	100
3.3.1 Κατάσταση πρακτικής .....	100
3.3.2 Προκλήσεις εφαρμογής αέριας λίπανσης στη ναυτιλία.....	102
3.3.3 Διαθέσιμες τεχνολογίες αέριας λίπανσης σε πλοία.....	104
3.3.4 Silverstream® System .....	106
3.3.5 Mitsubishi Air Lubrication System (MALS) .....	107
3.3.6 Επίπεδα ετοιμότητας τεχνολογίας λίπανσης αέρα (TRL).....	108
3.4 Ελαφρά Υλικά (Lightweight Materials).....	111
3.4.1 Προκλήσεις εφαρμογής ελαφρών υλικών στη ναυτιλία .....	113
3.4.2 Διαθέσιμες τεχνολογίες ελαφρών υλικών σε πλοία .....	114
3.5 Επιστρώσεις Κύτους και μείωση των αερίων του θερμοκηπίου .....	118
3.5.1 Κατάσταση πρακτικής στις επιστρώσεις κύτους.....	119
3.5.2 Προκλήσεις στις εφαρμογές επιστρώσεων κύτους.....	121
3.5.3 Τεχνολογίες επικάλυψης που ανταποκρίνονται στις προκλήσεις.....	123
3.5.4 Καινοτόμες τεχνολογίες επικαλύψεων.....	124
3.5.5 Επίπεδο ετοιμότητας τεχνολογίας (TRL) καινοτόμων τεχνολογιών επικάλυψης..	126
3.5.6 Μελέτη Περίπτωσης .....	130
3.6 Παρατηρήσεις-Σχολιασμός .....	132
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> .....	<b>134</b>

<b>Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....</b>	<b>134</b>
4.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη ναυτιλία .....	134
4.2 Ηλιακή Ενέργεια .....	135
4.2.1 Κατάσταση πρακτικής ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία .....	138
4.2.2 Προκλήσεις Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ναυτιλία .....	140
4.2.3 Ηλιακή υποβοηθούμενη ενέργεια σε πλοία μεγάλης κλίμακας .....	142
4.2.4 Εξελιγμένα Υβριδικά Ενεργειακά Συστήματα: Ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας με παραδοσιακές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	145
4.3 Αιολική Ενέργεια-Τεχνολογίες - Αρχές λειτουργίας.....	147
4.3.1 Η Αιολική Ενέργεια στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία .....	148
4.3.2 Παραγωγή αιολικής ενέργειας σε πλοία (WPG) .....	149
4.3.3 Μεθοδολογία ενσωμάτωσης συστημάτων μετατροπής ενέργειας στην ισχύ του πλοίου (wind energy conversion system, WECS).....	149
4.3.4 Προκλήσεις εφαρμογής συστημάτων μετατροπής αιολικής ενέργειας σε πλοία. ....	151
4.3.5 Αιολική πρόωση πλοίων (WASP).....	153
4.3.6 Προκλήσεις τεχνολογίας WASP.....	160
4.3.7 Τρέχουσες και προγραμματισμένες εφαρμογές (WASP) .....	162
4.3.8 Οικονομική αξιολόγηση και εξοικονόμηση καυσίμου με WASP.....	165
4.3.9 Τεχνολογική ετοιμότητα συστημάτων WASP .....	167
4.3.10 Τεχνολογία WASP για τη μείωση των εκπομπών .....	170
4.4 Κυψέλες καυσίμου .....	171
4.4.1 Συστήματα πρόωσης κυψελών καυσίμου στα πλοία.....	179
4.4.1.1 Υβριδικά συστήματα ισχύος που συνδυάζουν κυψέλες καυσίμου και αποθήκευση ενέργειας.....	179
4.4.1.2 Υβριδικά Συστήματα Κυψελών Καυσίμου-Στροβίλου .....	180
4.4.1.3 Υβριδικά Συστήματα Ισχύος Κυψελών Καυσίμου-Μηχανής Εσωτερικής Καύσης .....	182
4.4.2 Κρίσιμες Τεχνολογίες για πλοία που κινούνται με κυψέλες καυσίμου .....	183
4.4.3 Μελλοντικές προοπτικές και προκλήσεις για την τεχνολογία κυψελών καυσίμου .....	184
4.4.4 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις έργων και πλοίων με τεχνολογίες κυψελών καυσίμου .....	191
4.5 Παρατηρήσεις – Σχολιασμός.....	199
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>201</b>
<b>Ψηφιοποίηση ναυτιλίας .....</b>	<b>201</b>
5.1 Τεχνολογικές βάσεις και λύσεις.....	201
5.2 Διαδίκτυο πλοίων και θαλάσσιων υπηρεσιών.....	202



5.3 Τεχνητή Νοημοσύνη: Αυτόνομα Πλοία και Έξυπνη Ναυτιλία .....	203
5.4 Blockchains στην εφοδιαστική αλυσίδα και στο εμπόριο .....	204
5.5 Κατάσταση πρακτικής και διαθέσιμες τεχνολογίες (AI, ML) .....	205
5.6 Προηγμένες τεχνολογίες - Προκλήσεις .....	208
5.7 Πρωτοποριακά Έργα στην Αυτόνομη Ναυτιλία .....	210
5.7.1 Yara Birkeland .....	210
5.7.2 MEGURI2040 .....	212
5.7.3 SEAMLESS .....	213
5.7.4 HiNAS 2.0.....	214
5.7.5 Mayflower Autonomous Ship (MAS) .....	215
5.7.6 Orca AI .....	216
5.8 Παρατηρήσεις – Σχολιασμός .....	217
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> .....	<b>220</b>
<b>Συμπεράσματα</b> .....	<b>220</b>
6.1 Εναλλακτικά Καύσιμα .....	220
6.1.1 LNG.....	220
6.1.2 Μεθανόλη.....	221
6.1.3 Υδρογόνο .....	222
6.2 Υλικά και Σχεδιασμός .....	222
6.2.1 Μέγεθος σκάφους .....	223
6.2.2 Επικάλυψη γάστρας .....	223
6.2.3 Σχήμα γάστρας.....	224
6.2.4 Ελαφριά Υλικά.....	224
6.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....	225
6.3.1 Ηλιακή ενέργεια.....	225
6.3.2 Αιολική ενέργεια .....	226
6.3.3 Κυψέλες καυσίμου .....	227
6.4 Εφαρμογές AI και ML .....	228
Αναφορές .....	231

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Τρία λειτουργικά σενάρια μείωσης των εκπομπών αναθεωρημένης στρατηγικής (IMO, 2023) .....	19
Εικόνα 2: Εφοδιαστική αλυσίδα καυσίμου (Well-to-wake) (International Maritime Organization, 2023).....	20
Εικόνα 3: Ανάλυση κύκλου ζωής καυσίμων ναυτιλίας (Life Cycle Analysis) .....	21
Εικόνα 4: Γραφική απεικόνιση σύνθεσης LNG και της χαρακτηριστικής μείωσης όγκου στην υγρή φάση (CameronLNG, 2023).....	25
Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής παραγωγής LNG από φυσικό αέριο .....	25
Εικόνα 6: LNG : αλυσίδα λειτουργιών παραγωγής και κατανάλωσης (Energy API, 2015).....	27
Εικόνα 7: Αλυσίδα αξίας LNG που αποτελείται από την παραγωγή φυσικού αερίου, την υγροποίηση και την αποθήκευση, τη μεταφορά μέσω πλοίων και τέλος την λήψη, την επαναεριοποίηση και τη διανομή (Econnect, 2020) .....	29
Εικόνα 8: Ένταση άνθρακα της εφοδιαστικής αλυσίδας LNG (Blanton, et al., 2021) .....	29
Εικόνα 9: Ανάπτυξη του στόλου που τροφοδοτείται με LNG (IIF IIR, 2023).....	32
Εικόνα 10: Παγκόσμια ανάπτυξη στη χρήση και στις υποδομές LNG (SEA-LNG, 2023).....	35
Εικόνα 11: Οι υπάρχοντες σταθμοί LNG στην Ευρώπη (Gas Infrastructure Europe, 2018) ...	36
Εικόνα 12: Προβλεπόμενη αύξηση ικανότητας υγροποίησης (mtpa) 2023-27 (Alam, et al., 2023).....	37
Εικόνα 13: Τύπος πρόωσης ανά ηλικία πλοίου (τέλος Απριλίου 2023) (International Gas Union, 2023).....	42
Εικόνα 14: Ιστορικές και μελλοντικές παραδόσεις πλοίων μεταφοράς LNG ανά τύπο πρόωσης, 2017-2028 (International Gas Union, 2023).....	42
Εικόνα 15: Φάσεις του κύκλου ζωής της παραγωγής και χρήσης μεθανόλης ως καυσίμου στα πλοία (IMO, 2016) .....	48
Εικόνα 16: GHG emissions of natural gas extraction (U.S. Department of Energy, National Energy Laboratory, 2014). .....	49
Εικόνα 17: Εκπομπές CO <sub>2</sub> από μεθανόλη που παράγεται με φυσικό αέριο (IMO, 2016).....	50
Εικόνα 18: Εκπομπές CO <sub>2</sub> κατά τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικά κράτη (IMO, 2016) .....	52
Εικόνα 19: Well to tank εκπομπές GHG μεθανόλης που παράγεται από βιομάζα (IMO, 2016) .....	53
Εικόνα 20: Εκπομπές μεθανόλης κατά τη καύση σε μηχανές πλοίων (Sustainable Ships, 2023).....	56
Εικόνα 21: Παγκόσμια ζήτηση μεθανόλης για τα έτη 2019 έως 2022 (Argus, 2022) .....	57
Εικόνα 22: Εκτίμηση της δυναμικότητας αποθήκευσης μεθανόλης .....	58
Εικόνα 23: Λιμένες με διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης μεθανόλης το 2020 .....	60
Εικόνα 24: Εκπομπές GHG (CO <sub>2</sub> eq) για διαφορετικές μεθόδους παραγωγής συμπιεσμένου υδρογόνου (Prussi, et al., 2020).....	69
Εικόνα 25: Εκπομπές GHG (CO <sub>2</sub> eq) για διαφορετικές μεθόδους ηλεκτρόλυσης για παραγωγή συμπιεσμένου υδρογόνου (Prussi, και συν., 2020) .....	70
Εικόνα 26: Διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου, ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και ικανότητας ηλεκτρόλυσης για την παγκόσμια ναυτιλία το 2040 (EMSA, 2023)....	73
Εικόνα 27: Εξέλιξη της αύξησης μεγέθους πλοίων (σε TEU) 2005-2022 (a) και νέες παραγγελίες μεγάλων πλοίων (b) (Sánchez, και συν., 2021) .....	91
Εικόνα 28: Χαρακτηριστικά εφαρμογής συστήματος Silverstream® System σε διάφορα είδη πλοίων (Silverstream Technologies, 2023) .....	107

Εικόνα 29: Εικόνα πλοίου εξοπλισμένου με MALS. Ο πυθμένας του πλοίου καλύπτεται από φυσαλίδες αέρα που απελευθερώνονται από τους εγχυτήρες αέρα (KAWAKITA, και συν., 2015).....	108
Εικόνα 30: Εργασίες επίστρωσης στο πλοίο Stolt Lotus.....	131
Εικόνα 31: Δομή ενός τυπικού συστήματος παραγωγής Φ/Β.....	136
Εικόνα 32: Το διάγραμμα λειτουργίας ενός τυπικού αυτόνομου συστήματος παραγωγής Φ/Β.....	136
Εικόνα 33: Το διάγραμμα λειτουργίας ενός τυπικού συστήματος παραγωγής φωτοβολταϊκών συνδεδεμένων στο δίκτυο.....	137
Εικόνα 34: Το διάγραμμα λειτουργίας ενός τυπικού υβριδικού συστήματος παραγωγής Φ/Β.....	137
Εικόνα 35: <i>Aquarius Eco Ship (EcomarinePower, 2013)</i> .....	140
Εικόνα 36: <i>Τυπική δομή του συστήματος παραγωγής αιολικής ενέργειας</i> .....	147
Εικόνα 37: <i>Τρεις κύριοι τύποι ανεμογεννητριών</i> .....	148
Εικόνα 38: <i>Το πλοίο «Hornblower Hybrid»</i> .....	149
Εικόνα 39: <i>Συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας συνδεδεμένα με το κύριο δίαυλο συνεχούς ρεύματος του πλοίου (Paulson, et al., 2019)</i> .....	150
Εικόνα 40: <i>Συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας που συνδέονται με τον κύριο δίαυλο AC του πλοίου (Paulson, et al., 2019)</i> .....	151
Εικόνα 41: <i>Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας σκληρών πανιών (ABS, CE DELFT &amp; ARCSILEA, 2023)</i> .....	154
Εικόνα 42: <i>Σχηματική αναπαράσταση πτερυγίων αναρρόφησης (ABS, CE DELFT &amp; ARCSILEA, 2023)</i> .....	156
Εικόνα 43: <i>Σχηματική απεικόνιση ανεμόπτερο έλξης (ABS, CE DELFT &amp; ARCSILEA, 2023)</i> ...	157
Εικόνα 44: <i>Σχηματική απεικόνιση σύνθετης τροχιάς ανεμόπτερου έλξης κατά τη κίνηση πλοίου. Απεικονίζονται και οι δυνάμεις που δρουν στο ανεμόπτερο</i> .....	157
Εικόνα 45: <i>Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ρότορα Flettner (ABS, CE DELFT &amp; ARCSILEA, 2023)</i> .....	158
Εικόνα 46: <i>Σχηματική Αναπαράσταση πλοίου με μαλακά πανιά (ABS, CE DELFT &amp; ARCSILEA, 2023)</i> .....	159
Εικόνα 47: <i>Βασικό σχηματικό διάγραμμα κυψέλης καυσίμου υδρογόνου</i> .....	172
Εικόνα 48: <i>Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου-συσκευής αποθήκευσης ενέργειας (Bassam, et al., 2016)</i> .....	179
Εικόνα 49: <i>Σχηματικό διάγραμμα αεριοστροβίλου-FC (άμεση σύνδεση) (Buonomano, και συν., 2015)</i> .....	181
Εικόνα 50: <i>Σχηματικό διάγραμμα αεριοστροβίλου-FC (έμμεση σύνδεση) (Buonomano, και συν., 2015)</i> .....	182
Εικόνα 51: <i>Σχηματικό διάγραμμα μηχανής ICE-FC (Buonomano, και συν., 2015)</i> .....	183
Εικόνα 52: <i>Το Yara Birkeland καθ' οδόν προς τη Νορβηγία (Lavars, 2021)</i> .....	211
Εικόνα 53: <i>Sunflower Shiretoko, μεγάλο οχηματογωγό άνω των 10.000 τόνων που χρησιμοποιείται για δοκιμές επίδειξης (Nippon Foundation, 2022)</i> .....	213
Εικόνα 54: <i>Το MAS400 κατά την διάρκεια δοκιμαστικής λειτουργίας (Mayflower Autonomous Ship, 2023)</i> .....	216

## Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο.....	44
Πίνακας 2: Εταιρείες/έργα που χρησιμοποιούν συστήματα πρόωσης H <sub>2</sub> σε μηχανές εσωτερικής καύσης (EMSA, 2023) .....	79
Πίνακας 3: Τεχνολογίες μεγέθους πλοίου και εκτίμηση κατάστασης τεχνολογικής ωριμότητας.....	99
Πίνακας 4: Τεχνολογίες αερίων λίπανσης και εκτίμηση κατάστασης ωριμότητας.....	110
Πίνακας 5: Κατάσταση τεχνολογικής ωριμότητας των τεχνολογιών ελαφρών υλικών στη ναυτιλία.....	117
Πίνακας 6: Τεχνολογίες επίστρωσης κύτους πλοίων και εκτίμηση τεχνολογικής ωριμότητας .....	130
Πίνακας 7: Εφαρμογή σε πλοία μεγάλης κλίμακας που τροφοδοτούνται με ηλιακή ενέργεια .....	144
Πίνακας 8: Περιπτώσεις πλοίων που ενσωματώνουν ηλιακή ενέργεια σε υβριδικά συστήματα.....	146
Πίνακας 9: Επισκόπηση συστημάτων αιολικής πρόωσης (WASP) που εφαρμόζονται επί του παρόντος .....	164
Πίνακας 10: Αριθμός ολοκληρωμένων ή προγραμματισμένων συστημάτων αιολικής πρόωσης ανά τεχνολογία; εταιρείες που έχουν εφαρμόσει τεχνολογία αιολικής πρόωσης και εταιρείες που δραστηριοποιούνται (αλλά όχι απαραίτητα με ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις) ανά τεχνολογία (ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023).....	168
Πίνακας 11: Δεδομένα μείωσης κατανάλωσης καυσίμου σε πραγματικά πλοία με WASP (Wang, et al., 2022).....	171
Πίνακας 12: Τυπικά υλικά ηλεκτροδίων και ηλεκτρολυτών σε κυψέλες καυσίμου και οι αντίστοιχες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις (Tronstad, et al., 2017).....	176
Πίνακας 13: Βασικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου (Tronstad, et al., 2017) (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2020) .....	177
Πίνακας 14: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις πλοίων που εφαρμόζουν τεχνολογίες κυψελών καυσίμου .....	187
Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά παραδείγματα έργων και πλοίων-Εκτίμηση τεχνολογικής ωριμότητας.....	198
Πίνακας 16: Ψηφιακές εφαρμογές στη ναυτιλία.....	201
Πίνακας 17: Εκτίμηση TRL τεχνολογιών AI και ML στη ναυτιλία.....	207

# Τα καύσιμα στη διεθνή ναυτιλία-Πολιτικές μείωσης αερίων θερμοκηπίου

### 1.1 Εισαγωγή

Η μεγάλη εξάρτηση του διεθνούς ναυτιλιακού τομέα από τα ορυκτά καύσιμα για την κάλυψη των αναγκών πρόωσης των πλοίων τον έχει οδηγήσει να θεωρείται υπεύθυνος για το 3% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gases- GHG) (IMO, 2020). Η δημιουργία μιας επιτυχημένης πορείας απαλλαγής από τις εκπομπές άνθρακα για τον ναυτιλιακό κλάδο αποτελεί πρόκληση. Μολονότι οι πρόσφατες ενημερώσεις στη στρατηγική του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization- IMO) για τα GHG το 2023 είναι πιο ελπιδοφόρες από τους προηγούμενους στόχους που τέθηκαν το 2018, δεν υπάρχει καθορισμένη πορεία για την επίτευξη των νέων φιλοδοξιών, οι οποίες περιλαμβάνουν μείωση 100% των εκπομπών GHG έως το 2050 (IMO, 2023). Ωστόσο, η εκπλήρωση αυτών είναι επιτακτική ανάγκη. Μελέτες διαπίστωσαν ότι ο περιορισμός των εκπομπών κατά 34% έως το 2030 και η πλήρης μείωση των εκπομπών έως το 2050 είναι ουσιαστικής σημασίας προκειμένου η ναυτιλία να συνεισφέρει στον στόχο ελάττωσης της θερμοκρασίας κατά 1.5 °C που ορίζει η Συμφωνία του Παρισιού (Bullock, et al., 2022).

Είναι βέβαιο ότι απαιτείται ταχεία απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα εντός της επόμενης δεκαετίας, έχουν όμως σημειωθεί μικρά βήματα και ο τομέας δεν βρίσκεται σε κατάσταση που πιστοποιεί τη δυνατότητα επίτευξης των στόχων του (IEA, 2023). Επιπλέον, ο ρόλος του κλάδου στο παγκόσμιο εμπόριο καθιστά δύσκολο να επιτευχθούν οι απαιτούμενες μειώσεις GHG χωρίς δραστικές αλλαγές σε επίπεδο συστήματος και στον τρόπο με τον οποίο η βιομηχανία καταναλώνει τα ορυκτά καύσιμα (Van Leeuwen, et al., 2022). Ακόμη και αν άλλοι τομείς επιτύχουν τους στόχους για μείωση κατά 1.5 °C και τουλάχιστον δεν μεγεθυνθεί ο όγκος του ναυτιλιακού εμπορίου, θεωρείται πιθανό ότι θα χρειαστούν και πάλι πρόσθετα μέτρα (Tyndall, 2022). Οι βελτιώσεις της απόδοσης, όπως η αιολική πρόωση, η βελτιστοποίηση διαδρομής και ο περιορισμός διαρροών, μπορούν να επιδράσουν στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων (Du, et al., 2022). Ωστόσο, 100% μείωση των εκπομπών δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο με μέτρα αποτελεσματικότητας της λειτουργίας των πλοίων και των διαδρομών. Ως εκ τούτου, τα εναλλακτικά καύσιμα προσφέρουν έναν τρόπο μείωσης των εκπομπών σε λειτουργικά πλοία, ενώ παράλληλα μειώνουν την εξάρτηση

της βιομηχανίας από τα ορυκτά καύσιμα. Η χρήση πόρων χαμηλών εκπομπών άνθρακα και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης της ναυτιλίας προτείνεται ως μέρος της λύσης για τη μελλοντική ενεργειακή μετάβασή της (Rivarolo, et al., 2021). Η υιοθέτηση καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα είναι μια πολύπλευρη πρόκληση για τον κλάδο και η επιτυχής εφαρμογή θα απαιτήσει τη δημιουργία αξιόπιστων αλυσίδων εφοδιασμού, υποδομών ανεφοδιασμού καυσίμων, πολιτικών με επίκεντρο την απεξάρτηση άνθρακα και οικονομικούς μηχανισμούς για την προώθηση της υιοθέτησης (Mallouras, et al., 2021). Το πρώτο βήμα, ωστόσο, είναι να διασφαλιστεί ότι τα εναλλακτικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα, έτσι ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 100% έως το 2050.

Σε αυτή την εργασία γίνεται προσπάθεια να αξιολογηθούν ορισμένες επιλογές εναλλακτικών καυσίμων ως προς το αποτύπωμα τους σε GHG. Αναλύονται οι περιπτώσεις του LNG, της μεθανόλης, βιο-μεθανόλης καθώς και του υδρογόνου. Αυτά τα καύσιμα μεταξύ άλλων προσδιορίστηκαν από τη βιβλιογραφία ως επιλογές με υποσχόμενες δυνατότητες μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου διατηρώντας παράλληλα την τεχνική σκοπιμότητα. Παράλληλα εξετάστηκαν άλλες μέθοδοι για τη μείωση των εκπομπών, όπως η αιολική πρόωση, η χρήση αιολικής ενέργειας και οι κυψέλες καυσίμου εστιάζοντας τη μελέτη σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Οι τεχνολογίες βελτίωσης της απόδοσης επίσης αναπτύσσονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ειδικότερα εξετάζονται περιπτώσεις βελτίωσης απόδοσης μέσω της χρήσης νέων και βελτιωμένων υλικών π.χ. επικαλύψεις γάστρας, σχεδιασμού πλοίων και σχεδιασμού διαδρομών. Τέλος οι εφαρμογές καινοτόμων τεχνολογιών όπως της τεχνικής νοημοσύνης (AI) και της μηχανικής μάθησης (ML) αποτελούν μέρος των δυνατοτήτων για βελτίωση της απόδοσης στα σύγχρονα πλοία και δημιουργούν νέες ευκαιρίες που ο ναυτιλιακός τομέας καλείται να αξιοποιήσει για την επίτευξη των ζητούμενων στόχων μείωσης των αερίων θερμοκηπίου.

## 1.2 Τρέχουσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στη ναυτιλία

Ο ναυτιλιακός τομέας, αναπόσπαστο μέρος του παγκόσμιου εμπορίου και των μεταφορών, έχει καταγράψει σημαντική αύξηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) τα τελευταία χρόνια. Η αύξηση αυτή αποδίδεται κυρίως στην ταχεία ανάπτυξη του κλάδου, στην εξάρτηση από καύσιμα μεγάλης έντασης εκπομπών άνθρακα και στον τεράστιο όγκο των παγκόσμιων ναυτιλιακών δραστηριοτήτων.

Οι εκπομπές από τη ναυτιλιακή βιομηχανία επηρεάζονται από τους τύπους καυσίμων και την απόδοση των κινητήρων. Τα διαφορετικά καύσιμα έχουν ως αποτέλεσμα ποικίλες εκπομπές όπως CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και μεθανίου. Το 2015, από περίπου 300 εκατομμύρια μετρικούς τόνους παγκόσμιας κατανάλωσης θαλάσσιων καυσίμων, το 72% αποτελούνταν από υπολειμματικά καύσιμα (π.χ. βαρύ μαζούτ, HFO), το 26% ήταν αποστάγματα (π.χ. αέριο (LNG)) (Olmer, et al., 2017). Το HFO περιέχει συνήθως υψηλή περιεκτικότητα σε θείο και η διεθνής ναυτιλία συνέβαλε στο 13% των παγκόσμιων εκπομπών SO<sub>x</sub> το 2012 ετησίως (Jiang, et al., 2014). Το 2009, τα 15 μεγαλύτερα πλοία προκάλεσαν περισσότερη ρύπανση από θείο από ό,τι ολόκληρος ο παγκόσμιος στόλος αυτοκινήτων (760 εκατομμύρια αυτοκίνητα) μαζί (Vidal, 2009).

Τα καύσιμα απόσταξης όπως το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης (MGO) και το πετρέλαιο ντίζελ πλοίων (MDO) έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο, αλλά οι εκπομπές GHG και NO<sub>x</sub> που προκύπτουν από την καύση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να είναι παρόμοιες.

Ο ναυτιλιακός τομέας αντιπροσωπεύει περίπου το 2,8% έως 3% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τα τελευταία στοιχεία, με αξιοσημείωτη αύξηση των εκπομπών ανά ναυτικό μίλι κατά τη διάρκεια της πλεύσης στον ωκεανό. Αυτή η άνοδος μπορεί να αποδοθεί σε παράγοντες όπως οι αλλαγές στα πρότυπα του διεθνούς εμπορίου, συμπεριλαμβανομένης της περιφερειοποίησης των μεταφορών (IEA, 2023).

Επιπλέον οι ωριαίες εκπομπές κατά τις λιμενικές δραστηριότητες παρουσίασαν διακυμάνσεις, με άνοδο μεταξύ 2016 και 2019, ακολουθούμενη από μείωση από το 2019 έως το 2020. Αυτή η τάση συνδέεται με λειτουργικές ανεπάρκειες και την αναντιστοιχία μεταξύ της χωρητικότητας των λιμένων και της επιχειρησιακής ζήτησης (Bo, et al., 2023).

Τα λιμάνια της Ασίας, ιδιαίτερα η Κίνα και οι Ηνωμένες Πολιτείες, είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί εκπομπών από τις μεταφορές εμπορευματοκιβωτίων κατά τις λιμενικές δραστηριότητες, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 55% του παγκόσμιου συνόλου.

Η αύξηση της εμπορικής ζήτησης, ειδικά στην Ασία, η οποία αντιπροσωπεύει το 41% όλων των εμπορευμάτων που φορτώνονται, αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αύξηση των εκπομπών σε αυτά τα λιμάνια (Bo, et al., 2023).

Ιστορικά, πάνω από το 99% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης για τη διεθνή ναυτιλία έχει καλυφθεί από προϊόντα πετρελαίου. Το 2022, τα βιοκαύσιμα αντιπροσώπευαν λιγότερο από το 0,5% της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας από τη ναυτιλία (IEA, 2023).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εφαρμόσει τον κανονισμό παρακολούθησης, αναφοράς και επαλήθευσης (MRV) από το 2018, ο οποίος απαιτεί από τα μεγάλα πλοία να παρακολουθούν και να αναφέρουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ο κανονισμός MRV ήταν ένα

βασικό βήμα πριν από την ένταξη των θαλάσσιων εκπομπών στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS).

### 1.3 Εκπομπές από την Πηγή-στη-Δεξαμενή, από τη Δεξαμενή-στην-Κίνηση και από Πηγή-στην-Κίνηση

Οι όροι από την Πηγή στη Δεξαμενή ("Well-to-Tank"), από τη Δεξαμενή στη Κίνηση ("Tank-to-Wake") και από την Πηγή στην Κίνηση ("Well-to-Wake") χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής των καυσίμων, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους, ιδίως για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Η κατανόηση αυτών των όρων είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη αποτελεσματικών πολιτικών και στρατηγικών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση των εκπομπών σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων μεταφορών (Comer, et al., 2021).

- Well-to-Tank (WTT): Οι εκπομπές από την πηγή στη δεξαμενή περιλαμβάνουν όλες τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την παραγωγή, τη μεταφορά, τη μετατροπή και τη διανομή του καυσίμου πριν φορτωθεί στη δεξαμενή του πλοίου. Αυτές περιλαμβάνουν εκπομπές από την εξόρυξη πρώτων υλών (όπως του αργού πετρέλαιο), τη διύλισή τους σε καύσιμα χρήσης και τη μεταφορά αυτών των καυσίμων στο σημείο παράδοσης προς χρήση. Είναι ένα κρίσιμο μέτρο για την κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαφορετικών καυσίμων στα στάδια παραγωγής και προμήθειας. Οι εκπομπές από την πηγή στη δεξαμενή αποτελούν σημαντικό μέρος του συνολικού αποτυπώματος άνθρακα των καυσίμων.
- Tank-to-Wake (TTW): Πρόκειται για τις εκπομπές που προέρχονται από τη «δεξαμενή» (το σύστημα αποθήκευσης καυσίμου του πλοίου) έως την «κίνηση» (το σημείο της πραγματικής χρήσης του καυσίμου). Περιλαμβάνει όλες τις εκπομπές που προκύπτουν από την καύση του καυσίμου στον κινητήρα για την παραγωγή ενέργειας για κίνηση ή άλλη λειτουργία. Αυτή είναι η πιο άμεση και συχνά ορατή μορφή εκπομπών που σχετίζεται με τη χρήση καυσίμου. Οι εκπομπές Tank-to-Wake είναι συνήθως αυτές που στοχεύουν να αντιμετωπίσουν οι περισσότερες τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών και οι κανονισμοί στη ναυτιλία.
- Well-to-Wake (WTW): Οι εκπομπές Well-to-Wake είναι το άθροισμα των εκπομπών ανάντη (Well-to-Tank) και κατόντη (Tank-to-Wake), που επί της ουσίας καλύπτουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής του καυσίμου από την εξόρυξη έως την τελική χρήση. Αυτό



το ολοκληρωμένο μέτρο είναι απαραίτητο για την πλήρη κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαφορετικών καυσίμων και πηγών ενέργειας. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο πλαίσιο της σύγκρισης των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως το υδρογόνο ή τα βιοκαύσιμα.

Για την αποτελεσματική χάραξη πολιτικής για το κλίμα και το περιβάλλον, χρειάζεται να ληφθούν υπόψη οι εκπομπές "Well-to-Wake". Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι πολιτικές δεν ευνοούν ακούσια καύσιμα ή τεχνολογίες που έχουν χαμηλότερες εκπομπές Tank-to-Wake, αλλά χαμηλότερες συνολικές εκπομπές Well-to-Wake.

Συνοπτικά, το πλαίσιο Well-to-Tank, Tank-to-Wake και Well-to-Wake προσφέρει μια ολοκληρωμένη άποψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διαφόρων καυσίμων και πηγών ενέργειας. Είναι ένα ουσιαστικό εργαλείο για τη χάραξη πολιτικής, τη βιομηχανία και τους καταναλωτές ώστε να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις που συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

#### 1.4 Μείωση εκπομπών στη ναυτιλία: Νέες κανονιστικές προσεγγίσεις της ΕΕ

Η διεθνής ναυτιλιακή βιομηχανία, η οποία συμβάλλει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές, υφίσταται σημαντικές αλλαγές λόγω των νέων κανονισμών που στοχεύουν στη μείωση των περιβαλλοντικών της επιπτώσεων. Σ' αυτήν την παράγραφο γίνεται μία προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης της τρέχουσας κατάστασης της διεθνούς ναυτιλίας σχετικά με τις εκπομπές ρύπων, τη χρήση καυσίμων και τα ρυθμιστικά περιβάλλοντα, που περιλαμβάνει τα πιο πρόσφατα δεδομένα.

Από το 2024, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δώσει εντολή στις ναυτιλιακές εταιρείες να αγοράζουν άδειες άνθρακα (EU carbon permits) για να καλύψουν ένα μέρος των εκπομπών τους. Αυτή η πρωτοβουλία θα ξεκινήσει από το 40% το 2024, θα αυξηθεί στο 70% το 2025 και θα φτάσει στο 100% έως το 2026. Στόχος είναι να ενσωματωθούν όλες οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου και διοξειδίου του αζώτου από τα θαλάσσια ταξίδια εντός της ΕΕ, συμπεριλαμβανομένου του 50% των εκπομπών από διεθνή ταξίδια που ξεκινούν και ολοκληρώνονται στην Ε.Ε. Αυτή η ρυθμιστική αλλαγή στοχεύει να δώσει κίνητρα στον ναυτιλιακό τομέα να επενδύσει σε πιο πράσινες τεχνολογίες και να βελτιώσει έτσι την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, ιδιαίτερα κοντά σε ποτάμια και ακτές (Abnett, 2022).

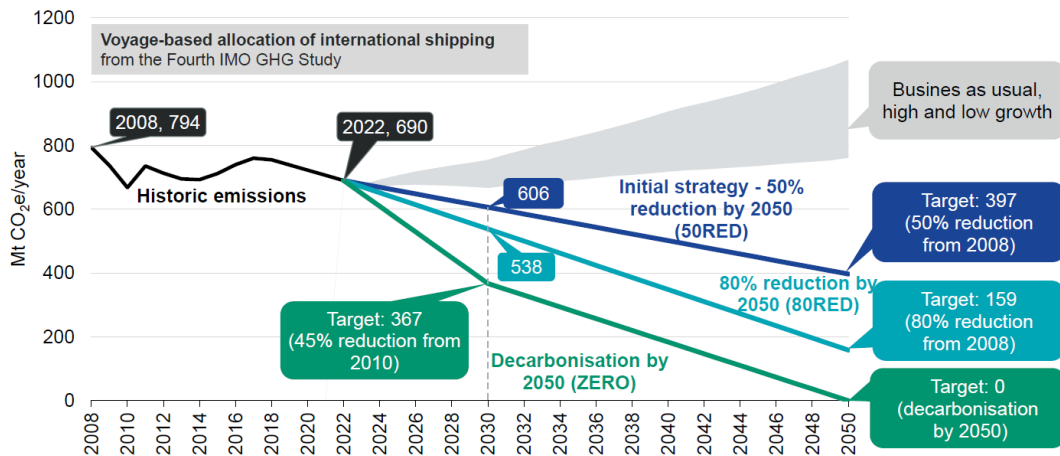
Επιπλέον, το πακέτο «Fit for 55» της ΕΕ περιλαμβάνει προτάσεις, όπως ένας νέος ναυτιλιακός κανονισμός FuelEU για την τόνωση της ζήτησης για ανανεώσιμα καύσιμα πλοίων χαμηλών εκπομπών άνθρακα, αναθεώρηση της οδηγίας για την υποδομή εναλλακτικών καυσίμων με

τον καθορισμό υποχρεωτικών στόχων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά και επιτάχυνση της προμήθειας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω της Οδηγίας για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Renewable Energy Directive-RED) (European Commission, 2023).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις και η καινοτομία είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη αυτών των στόχων. Όπως αναφέρει ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency - IEA), τα πετρελαϊκά προϊόντα κυριαρχούν ιστορικά στη ζήτηση ενέργειας του διεθνούς ναυτιλιακού τομέα. Ωστόσο, για την ευθυγράμμιση με το σενάριο Καθαρών Μηδενικών Εκπομπών (Net Zero Emissions-NZE) έως το 2030, η βιομηχανία πρέπει να αυξήσει σημαντικά τη διείδυση εναλλακτικών καυσίμων χαμηλών και μηδενικών εκπομπών, όπως τα βιοκαύσιμα, η μεθανόλη, το υδρογόνο και η αμμωνία. Οι κορυφαίες ναυτιλιακές εταιρείες έχουν αρχίσει να παραγγέλνουν πλοία ικανά να χρησιμοποιούν αυτά τα εναλλακτικά καύσιμα, με αξιοσημείωτη αύξηση των παραγγελιών για πλοία που τροφοδοτούνται με μεθανόλη (IEA, 2023).

Επιπλέον, περισσότερα από 200 πιλοτικά έργα και έργα επίδειξης επικεντρώνονται σε τεχνολογίες πλοίων μηδενικών εκπομπών. Οι εξελίξεις περιλαμβάνουν κατευθυντήριες γραμμές για τη χρήση καυσίμου μεθανόλης σε πλοία, εγκρίσεις για πλοία μεταφοράς χύδην που κινούνται με αμμωνία και την πρώτη έγκριση για μονάδα κυψελών καυσίμου θαλάσσης. Για την υποστήριξη αυτών των τεχνολογικών αλλαγών, κρίνεται απαραίτητη η νέα υποδομή ανεφοδιασμού καυσίμων για εναλλακτικά καύσιμα. Πρωτοβουλίες όπως η πρώτη στον κόσμο εγκατάσταση ανεφοδιασμού υγρού υδρογόνου και σχέδια ανεφοδιασμού αμμωνίας έχουν ανακοινωθεί, θέτοντας τις βάσεις για μια πιο βιώσιμη διεθνή ναυτιλιακή βιομηχανία. Οι ετήσιες εκθέσεις για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την ενεργειακή απόδοση του στόλου που παρακολουθείται δημοσιεύονται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για να ενημερώσει το κοινό σχετικά με την πρόοδο και τη συμμόρφωση του κλάδου (European Commission, 2023).

Αυτές οι λεπτομερείς πληροφορίες, που υποστηρίζονται από αυστηρές πολιτικές της ΕΕ και παγκόσμιες τεχνολογικές πρωτοβουλίες, δείχνουν τις μετασχηματιστικές προσπάθειες που έγιναν για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της διεθνούς ναυτιλιακής βιομηχανίας. Αυτές οι δράσεις συμβάλλουν σημαντικά στους ευρύτερους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και των παγκόσμιων στρατηγικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.



Εικόνα 1: Τρία λειτουργικά σενάρια μείωσης των εκπομπών αναθεωρημένης στρατηγικής (IMO, 2023)

## 1.5 Κατευθυντήριες γραμμές υπολογισμού GHG του κύκλου ζωής των καυσίμων πλοίων (Κατευθυντήριες οδηγίες LCA)

Η στρατηγική του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία, η οποία ενημερώθηκε το 2023, υπογραμμίζει τη δέσμευση της ναυτιλιακής βιομηχανίας να μειώσει σημαντικά το αποτύπωμα άνθρακα (IMO, 2023). Μέχρι το 2030, η στρατηγική στοχεύει σε μείωση της έντασης του άνθρακα κατά 40%, με μακροπρόθεσμο στόχο τις καθαρές μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου γύρω στο 2050, αναγνωρίζοντας τις διαφορετικές ικανότητες των κρατών για την επίτευξη αυτών των στόχων.

Προς διευκόλυνση αυτής της μετάβασης, ο IMO έχει θέσει ενδεικτικά ορόσημα, φιλοδοξώντας να περιορίσει τις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse gases, GHGs) από τη διεθνή ναυτιλία κατά 20%, με στόχο το 30% έως το 2030 και κατά 70%, με φιλοδοξίες 80% έως το 2040, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008. Αυτά τα ορόσημα καθοδηγούνται από τις εκτιμήσεις εκπομπών GHG των ναυτιλιακών καυσίμων, όπως περιγράφονται στις Κατευθυντήριες Γραμμές Έντασης GHG κύκλου ζωής του οργανισμού για καύσιμα πλοίων. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση περιλαμβάνει όλες τις εκπομπές από την παραγωγή και την προμήθεια του καυσίμου (Well-to-Tank), καθώς και την κατανάλωσή του από τα πλοία (Tank-to-Wake).

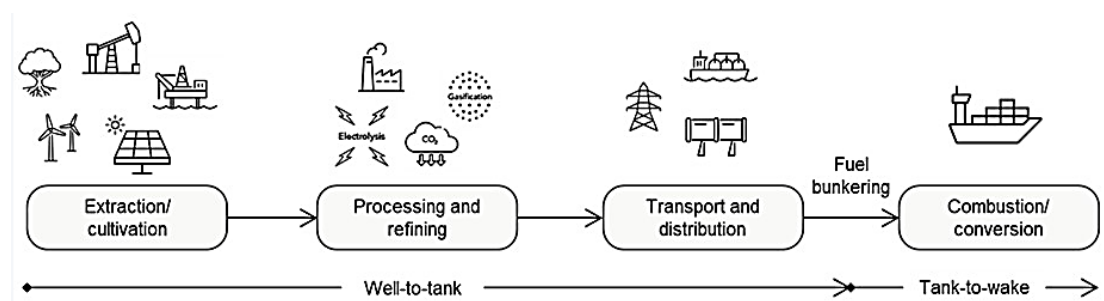
Σύμφωνα με την Τέταρτη Μελέτη GHG του IMO 2020, τα εναλλακτικά καύσιμα χαμηλών/μηδενικών εκπομπών άνθρακα αναμένεται να αντιπροσωπεύουν περίπου το 64% της μείωσης του CO<sub>2</sub> στη ναυτιλία έως το 2050 (IMO, 2020). Η μεθοδολογία αξιολόγησης του κύκλου ζωής (Life-cycle assessment, LCA) αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι αυτής της προβολής, προσφέροντας ένα συστηματικό πλαίσιο για την αξιολόγηση των

περιβαλλοντικών επιπτώσεων των καυσίμων από την παραγωγή έως την τελική χρήση. Αυτή η μεθοδολογία συγχωνεύει τις εκπομπές ανάντη (Well-to-Tank) και κατάντη (Tank-to-Wake) για να δώσει μια ολιστική εικόνα των εκπομπών GHG ενός καυσίμου.

Οι κατευθυντήριες γραμμές LCA, που θεσπίστηκαν από το ψήφισμα MEPC.376 της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee, MEPC) του IMO, παρέχουν το απαραίτητο πλαίσιο για τον υπολογισμό των συντελεστών εκπομπής Well-to-Tank και Tank-to-Wake. Οι κατευθυντήριες γραμμές είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των συνολικών εκπομπών GHG που σχετίζονται με την παραγωγή και τη χρήση καυσίμων πλοίων.

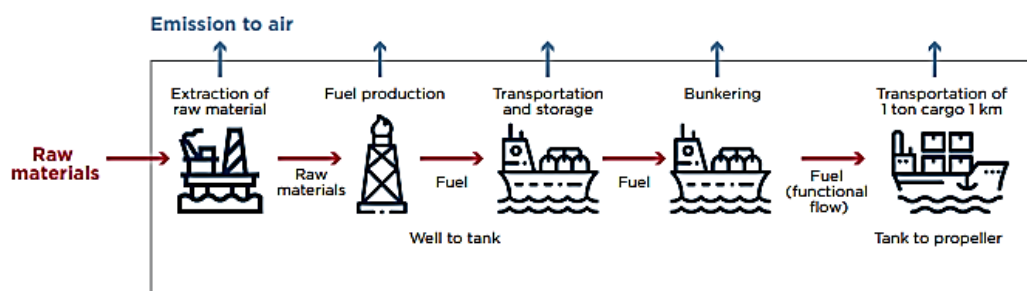
Για να προωθήσει αυτές τις προσπάθειες, το MEPC 80 προέτρεψε να επανεξετάσουν τις τρέχουσες πρακτικές σχετικά με τη βιωσιμότητα και την επαλήθευση και να συγκαλέσει ένα εργαστήριο εμπειρογνομόνων σχετικά με την ένταση του κύκλου ζωής GHG των καυσίμων πλοίων. Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη του πλαισίου LCA θα αποτελέσει αντικείμενο συζήτησης στο Intersessional Working Group on Reduction of GHG Emissions from Ships (ISWG-GHG 16) τον Μάρτιο του 2024, καταδεικνύοντας την αφοσίωση του IMO σε ένα βιώσιμο και χαμηλών εκπομπών άνθρακα θαλάσσιο μέλλον.

Η μετάβαση σε καύσιμα χαμηλών και μηδενικών εκπομπών στη ναυτιλία δεν είναι απλώς μια ρυθμιστική πρόκληση, αλλά και μια τεχνολογική και οικονομική πρόκληση, που απαιτεί την ανάπτυξη νέων καυσίμων, τεχνολογιών πρόωσης και παγκόσμιας υποδομής καυσίμων. Το πλαίσιο και οι κατευθυντήριες γραμμές ανάλυσης κύκλου ζωής αποτελούν βασικά εργαλεία για τη διασφάλιση ότι η στροφή της ναυτιλιακής βιομηχανίας σε εναλλακτικά καύσιμα συμβάλλει αποτελεσματικά στην παγκόσμια μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.



Εικόνα 2: Εφοδιαστική αλυσίδα καυσίμου (Well-to-wake) (International Maritime Organization, 2023)

Η Εικόνα 2 παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA), διευκρινίζοντας τις εκπομπές σε διακριτές καταστάσεις, περιλαμβάνοντας την εξόρυξη πρώτων υλών, την παραγωγή καυσίμου, τη μεταφορά, την αποθήκευση, τις διαδικασίες ανεφοδιασμού καυσίμων και καταλήγοντας στην καύση στο θαλάσσιο σκάφος.



Εικόνα 3: Ανάλυση κύκλου ζωής καυσίμων ναυτιλίας (Life Cycle Analysis)

Η περίπλοκη φύση των διαδικασιών παραγωγής καυσίμου είναι ένα κομβικό σημείο στην αξιολόγηση του αποτυπώματος άνθρακα. Οι διαδρομές που χαρακτηρίζονται από υψηλή κατανάλωση ενέργειας και «ένταση άνθρακα» ενδέχεται να αντιμετωπίσουν μειωμένη ελκυστικότητα στο μέλλον. Αυτή η μείωση της ελκυστικότητας δεν βασίζεται αποκλειστικά σε περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά στις πιθανές επιπτώσεις στη δυναμική της τιμολόγησης των καυσίμων, λόγω των προτεινόμενων εισφορών άνθρακα. Η προοπτική αυξημένου κόστους καυσίμων εισάγει μια οικονομική διάσταση, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για μια ισορροπημένη αξιολόγηση που να ενσωματώνει τόσο την περιβαλλοντική βιωσιμότητα όσο και την οικονομική βιωσιμότητα.

Παράλληλα, το φάσμα των επικείμενων ρυθμιστικών πλαισίων πλανάται πάνω από μεθόδους παραγωγής υψηλής έντασης άνθρακα. Η πρόβλεψη αυστηρών κανονισμών, σχεδιασμένων για τον περιορισμό των πρακτικών υψηλής έντασης άνθρακα, μπορεί να επιβάλει περιορισμούς σε τέτοιες μεθοδολογίες. Αυτό το ρυθμιστικό τοπίο υπογραμμίζει τη δυναμική φύση του ενεργειακού τομέα, καθιστώντας αναγκαία μια στραμμένη προς καθαρό μέλλον προσέγγιση στις μεθοδολογίες παραγωγής καυσίμων.

Ένας σημαντικός παράγοντας στην αναζήτηση για περιβαλλοντικά υπεύθυνα παραγωγή καυσίμου περιλαμβάνει τον ρόλο των πρώτων υλών. Η επιλογή και η προμήθεια πρώτων υλών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στον μετριασμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) στον κύκλο ζωής. Οι βέλτιστες αποφάσεις στην επιλογή πρώτων υλών μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση των συνολικών εκπομπών, ικανοποιώντας έτσι τους ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας.

## 1.6 Επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας

Το Επίπεδο Ετοιμότητας Τεχνολογίας (Technology Readiness Level -TRL) είναι ένα συστηματικό και ευρέως χρησιμοποιούμενο πλαίσιο αξιολόγησης που εξετάζει την ωριμότητα και την ετοιμότητα μιας τεχνολογίας ή καινοτομίας για ανάπτυξη σε πρακτικές εφαρμογές. Το TRL χρησιμοποιείται κυρίως στην έρευνα, την ανάπτυξη και τη διαχείριση της καινοτομίας για τη μέτρηση της προόδου μιας τεχνολογίας από τη σύλληψή της έως την τελική εφαρμογή της. Το TRL εκφράζεται συνήθως με μια αριθμητική τιμή μεταξύ 1 και 9, όπου κάθε επίπεδο αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης και ετοιμότητας. Ακολουθεί μια λεπτομερής περιγραφή κάθε επιπέδου TRL:

TRL 1 - Basic Principles Observed: Σε αυτό το επίπεδο, προσδιορίζονται επιστημονικές αρχές ή έννοιες που έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν σε νέες τεχνολογίες. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει θεμελιώδη έρευνα, θεωρητικές μελέτες και υποθέσεις, αλλά δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία πρακτικής εφαρμογής.

TRL 2 - Technology Concept Formulated: Στο TRL 2, η βασική ιδέα για μια τεχνολογία έχει διατυπωθεί και οι ερευνητές μπορεί να αρχίσουν να πειραματίζονται με πιθανά σχέδια ή προσεγγίσεις. Ωστόσο, δεν υπάρχουν ακόμα πειραματικά στοιχεία που να υποστηρίζουν τη σκοπιμότητα της ιδέας.

TRL 3 - Proof of Concept: Σε αυτό το στάδιο, οι ερευνητές έχουν πραγματοποιήσει αρχικά πειράματα ή αναλύσεις για να αποδείξουν ότι η ιδέα της τεχνολογίας είναι εφικτή. Αυτό συχνά περιλαμβάνει δοκιμές εργαστηριακής κλίμακας ή πρωτότυπα μικρής κλίμακας για την επικύρωση βασικών υποθέσεων.

TRL 4 - Technology Validated in Laboratory: Στο TRL 4, η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί περαιτέρω και επικυρωθεί υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες. Οι ερευνητές στοχεύουν να βελτιώσουν την τεχνολογία και να αξιολογήσουν τα χαρακτηριστικά απόδοσης, τους πιθανούς περιορισμούς και τους κινδύνους.

TRL 5 -Technology Validated in Relevant Environment: Η τεχνολογία δοκιμάζεται σε πραγματικό περιβάλλον που μοιάζει πολύ με τις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας. Οι ερευνητές συγκεντρώνουν δεδομένα για την απόδοση της τεχνολογίας και αξιολογούν την καταλληλότητά της για πρακτικές εφαρμογές.

TRL 6 -Technology Demonstrated in Relevant Environment: Στο TRL 6, η τεχνολογία επιδεικνύεται σε ένα σχετικό επιχειρησιακό περιβάλλον, συχνά ως πρωτότυπο ή πιλοτικό σύστημα. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει πιο εκτεταμένες δοκιμές, συλλογή δεδομένων και επικύρωση για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητά του.

TRL 7 - System Prototype Demonstration in Operational Environment: Στο TRL 7, ένα πρωτότυπο ή σύστημα πλήρους κλίμακας αναπτύσσεται και επιδεικνύεται σε επιχειρησιακό περιβάλλον. Αυτό το στάδιο εστιάζει στην αξιολόγηση της ολοκλήρωσης του συστήματος, της αξιοπιστίας και της συνολικής απόδοσης.

TRL 8 - System Complete and Qualified: Η τεχνολογία έχει φτάσει σε υψηλό επίπεδο ωριμότητας στο TRL 8. Έχει υποβληθεί σε αυστηρές δοκιμές, πιστοποίηση και επαλήθευση για να πληροί όλες τις σχετικές προδιαγραφές και απαιτήσεις για τη χρήση για την οποία προορίζεται.

TRL 9 - Actual System Proven in Operational Environment: Το TRL 9 σημαίνει ότι η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στο προβλεπόμενο λειτουργικό της περιβάλλον. Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει ανάπτυξη πλήρους κλίμακας, συχνά ως σύστημα παραγωγής, και συνεχή παρακολούθηση για απόδοση, συντήρηση και βελτίωση.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η μετάβαση μιας τεχνολογίας από το ένα επίπεδο TRL στο επόμενο περιλαμβάνει προσεκτικό σχεδιασμό, ανάπτυξη και αξιολόγηση, καθώς και την κατανομή πόρων και τον μετριασμό των κινδύνων. Οι αξιολογήσεις TRL χρησιμοποιούνται συνήθως σε κυβερνητικές υπηρεσίες, τη βιομηχανία και τον ακαδημαϊκό χώρο για να καθοδηγήσουν τη λήψη αποφάσεων, να δώσουν προτεραιότητα στις προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης, να εξασφαλίσουν χρηματοδότηση και να διαχειριστούν αποτελεσματικά τα έργα καινοτομίας.

### Εναλλακτικά καύσιμα σε πλοία

#### 2.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)

Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα του ενεργειακού τοπίου, μέσω της μετατροπής του φυσικού αερίου σε μια ευέλικτη, μεταφερόμενη και αποθηκευμένη υγρή μορφή. Ο μετασχηματισμός αυτός λαμβάνει χώρα μέσω μιας διεργασίας ψύξης όπου το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε κατάσταση θερμοκρασίας περίπου  $-160^{\circ}\text{C}$  (ή  $-260^{\circ}\text{F}$ ) υπό τυπική ατμοσφαιρική πίεση. Αυτή η μέθοδος όχι μόνο μετατρέπει το αέριο σε ένα διαυγές, άχρωμο και άοσμο υγρό αλλά επιτυγχάνει και αξιοσημείωτη μείωση όγκου, που ξεπερνά τις 600 φορές. Μια τέτοια δραστική μείωση του όγκου αφενός διευκολύνει την αποτελεσματική αποθήκευση σε ειδικές δεξαμενές, αφετέρου επιτρέπει τη μεταφορά συμβάλλοντας στην παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού ενέργειας.

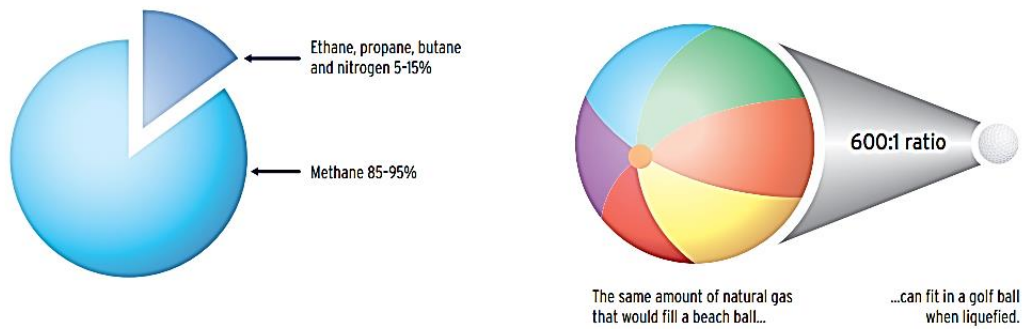
Η αποθήκευση LNG απαιτεί ακρίβεια και τήρηση αυστηρών συνθηκών. Οι εξειδικευμένες κρυογονικές δεξαμενές είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της σταθερότητας του υγρού, δεδομένης της μη διαβρωτικής και μη τοξικής φύσης του. Ωστόσο, οι ακραίες θερμοκρασίες και οι συνθήκες που απαιτούνται για την υγροποίηση απαιτούν προσεκτικό χειρισμό σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας (value chain).

Το LNG ως προς την σύνθεσή του, είναι ένα μείγμα διαφόρων ενώσεων. Το μεθάνιο είναι το κυρίαρχο συστατικό με περιεκτικότητα 80 – 99 % κατά mole, τα άλλα συστατικά είναι το αιθάνιο, το προπάνιο και οι βαρύτεροι υδρογονάνθρακες, που φτάνουν ως και 20 % mole, μαζί με δευτερεύουσες μη υδρογονάνθρακες ουσίες. Η επεξεργασία πριν από την υγροποίηση είναι μια κρίσιμη φάση, με στόχο την απομάκρυνση των μη υδρογονανθρακικών συστατικών όπως το διοξείδιο του άνθρακα, ο υδράργυρος, οι θειούχες ενώσεις και το νερό. Ωστόσο, παραμένουν άζωτο και μερικοί βαρύτεροι υδρογονάνθρακες, διαμορφώνοντας μια σύνθεση LNG που τυπικά υπερβαίνει το 95% μεθάνιο και αιθάνιο. Περαιτέρω εξευγενισμός μειώνει την περιεκτικότητα σε άζωτο σε περίπου ένα τοις εκατό ή λιγότερο πριν από την αποθήκευση στην εγκατάσταση υγροποίησης.

Η περίπλοκη σχέση μεταξύ της σύνθεσης LNG και της διαδικασίας παραγωγής υπογραμμίζει τη σημασία της προσαρμογής της επεξεργασίας LNG για την κάλυψη των αυστηρών απαιτήσεων διαφορετικών αγορών. Αυτή η προσαρμοσμένη προσέγγιση ενσωματώνεται στη διαδικασία εξευγενισμού του φυσικού αερίου, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της τελικής σύνθεσης και της θερμικής αξίας του LNG. Η αφαίρεση των πεντανίων και των βαρύτερων υδρογονανθράκων σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα είναι



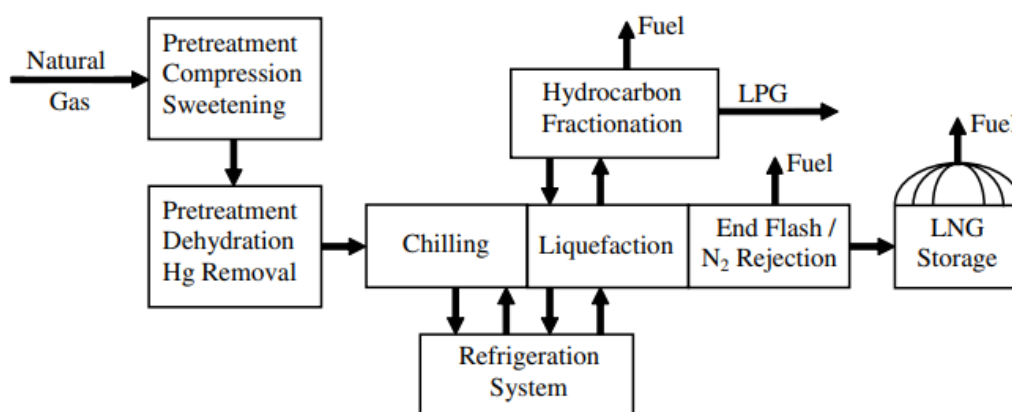
επιτακτική και οι στρατηγικές αποφάσεις, με γνώμονα την αγορά, υπαγορεύουν τη συμπερίληψη των δυνατοτήτων για την απομάκρυνση υγρών φυσικού αερίου (π.χ. αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο) στον συνολικό σχεδιασμό της μονάδας.



Εικόνα 4: Γραφική απεικόνιση σύνθεσης LNG και της χαρακτηριστικής μείωσης όγκου στην υγρή φάση (CameronLNG, 2023)

### 2.1.1 Διαδικασία παραγωγής LNG

Η διαδικασία υγροποίησης του φυσικού αερίου, απεικονίζεται στην Εικόνα 4 όπου παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα ροής εγκαταστάσεων LNG. Η διαδικασία παραγωγής είναι μία περίπλοκη αλληλεπίδραση πολλαπλών σταδίων που περιλαμβάνουν μονάδες σχεδιασμένες με ακρίβεια.



Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής παραγωγής LNG από φυσικό αέριο

Η διαδικασία παραγωγής Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) είναι περίπλοκη και περιλαμβάνει πολλά κρίσιμα στάδια (Energy API, 2015):

- Επεξεργασία πριν από την υγροποίηση: Το φυσικό αέριο ως πρώτη ύλη εξόρυξης περιέχει διάφορες ακαθαρσίες. Για να προετοιμαστεί για υγροποίηση, υποβάλλεται σε προ-επεξεργασία. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την αφαίρεση νερού, συμπυκνωμάτων, όξινων αερίων, διοξειδίου του άνθρακα, υδροθείου και υδραργύρου. Αυτά τα βήματα είναι απαραίτητα για την πρόληψη ζητημάτων όπως ο σχηματισμός πάγου κατά την υγροποίηση και η διάβρωση σε αγωγούς και εναλλάκτες θερμότητας LNG. Μετά από αυτή τη διαδικασία, το αέριο προψύχεται και βαρύτερα υγρά διαχωρίζονται από το μείγμα (Econnect, 2020).
- Υγροποίηση: Ο πυρήνας της διαδικασίας παραγωγής LNG είναι η υγροποίηση του φυσικού αερίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την ψύξη του φυσικού αερίου στους  $-160^{\circ}\text{C}$  περίπου, γεγονός που μειώνει τον όγκο του κατά περίπου 600 φορές, καθιστώντας το πιο οικονομικό για τη μεταφορά με πλοίο. Η διαδικασία υγροποίησης και ψύξης βασίζονται σε θερμοδυναμικούς κύκλους ψύξης που αναπτύσσονται σε κρουονικούς εναλλάκτες θερμότητας. Αυτή η διαδικασία μπορεί να ακολουθήσει δύο κύριες μεθόδους: την κλασική διαδικασία τύπου «καταρράκτη» που χρησιμοποιεί διαφορετικά ψυκτικά σε διάφορες θερμοκρασίες ή τον κύκλο μικτού ψυκτικού που χρησιμοποιεί ένα μόνο μείγμα ψυκτικών.
- Αποθήκευση: Μετά την υγροποίηση, το LNG αποθηκεύεται σε εξειδικευμένες κρουονικές δεξαμενές σχεδιασμένες να διατηρούν την υγρή του κατάσταση σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Αυτές οι λύσεις αποθήκευσης κατέστησαν δυνατή τη δημιουργία μακροπρόθεσμων αποθεμάτων αποθήκευσης αερίου, τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα μέσω διαδικασιών επαναεριοποίησης, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις αιχμής (Manjur Khan, 2020).
- Μεταφορά: Το LNG μεταφέρεται κυρίως δια θαλάσσης χρησιμοποιώντας ειδικά σχεδιασμένους μεταφορείς LNG. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι συστημάτων κατασκευής δεξαμενών που χρησιμοποιούνται: Τύποι μεμβράνης και Τύποι Moss Rosenberg. Καθένας έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την κατασκευή και τη μόνωση για να εξασφαλίσει την ασφαλή και αποτελεσματική μεταφορά LNG.
- Περιβαλλοντικά ζητήματα και ζητήματα ασφάλειας: Αν και το LNG είναι ένα καύσιμο καθαρότερο σε σύγκριση με τα συμβατικά όπως το πετρέλαιο, η παραγωγή του έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ιδίως όσον αφορά τις εκπομπές μεθανίου τόσο κατά την εξόρυξη, όσο και κατά την επεξεργασία και τη μεταφορά. Η βιομηχανία LNG επικεντρώνεται στην ελαχιστοποίηση αυτών των διαρροών μεθανίου και στη βελτίωση της συνολικής περιβαλλοντικής απόδοσης. Η ασφάλεια επίσης αποτελεί

πρωταρχικό μέλημα στον κλάδο, με αυστηρά μέτρα ασφαλείας και αυστηρούς βιομηχανικούς κανονισμούς για την πρόληψη ατυχημάτων και τη διασφάλιση του ασφαλούς χειρισμού του LNG.



Εικόνα 6: LNG : αλυσίδα λειτουργιών παραγωγής και κατανάλωσης (Energy API, 2015)

### 2.1.2 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην αλυσίδα LNG

Η αλυσίδα αξίας (value chain) LNG μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες:

- Upstream: εξόρυξη και παραγωγή φυσικού αερίου, μεταφορά και υγροποίηση.
- Midstream: μεταφορά LNG
- Downstream: επαναεριοποίηση και καύση LNG (δηλαδή χρήση του επαναεριοποιημένου LNG ως καύσιμο).

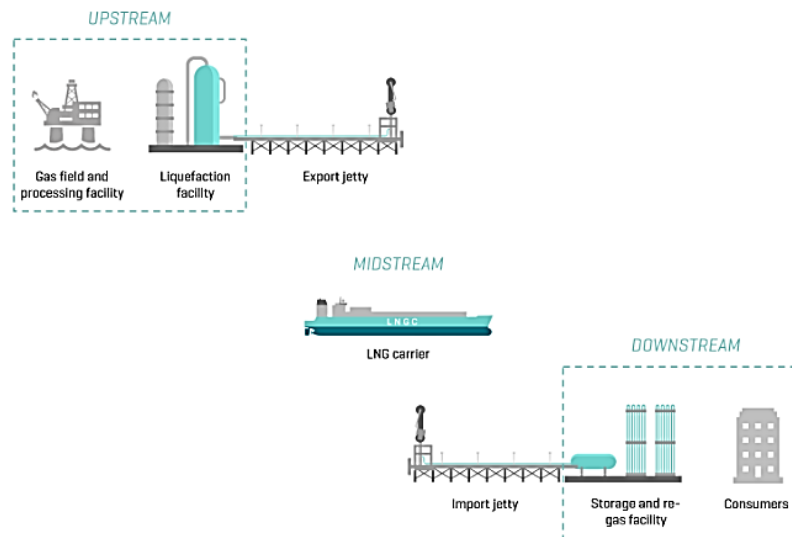
Κατά την εξέταση της αλυσίδας αξίας LNG, οι εκπομπές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες ομάδες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα πάντα, δηλ. από την ανάντη παραγωγή (upstream) έως την επαναεριοποίηση (Εικόνα 7). Αυτή η κατηγορία αναφέρεται ως εκπομπές παραδοτέες από το πλοίο (delivered ex-ship DES) ή εκπομπές "Well to Tank" . Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει και την κατάντη καύση του φυσικού αερίου. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός των εκπομπών από την κατάντη καύση ενός φορτίου LNG στον τομέα της ενέργειας είναι σχετικά απλός. Για παράδειγμα, όταν το φυσικό αέριο καίγεται, εκπέμπει 117 lb CO<sub>2</sub>e/MMBtu . Υποθέτοντας 52 MMBtu ανά μετρικό τόνο LNG ένας μετρικός τόνος LNG έχει ως αποτέλεσμα άμεσες εκπομπές 6.084 lb CO<sub>2</sub>e ή 2.76 μετρικούς τόνους CO<sub>2</sub>e. Αντίστοιχα, ένα τυπικό φορτίο LNG 70.000 μετρικών τόνων έχει ως αποτέλεσμα εκπομπές κατάντη περίπου 190.000 μετρικών τόνων ή 0,19 εκατομμυρίων μετρικών τόνων CO<sub>2</sub>e (US Energy Information Administration, 2016).

Ωστόσο, ο υπολογισμός των υπόλοιπων εκπομπών του κύκλου ζωής LNG (δηλαδή εκπομπές WTT) είναι ιδιαίτερα πιο περίπλοκος. Αυτή η πολυπλοκότητα προκύπτει από το γεγονός ότι οι εκπομπές WTT περιλαμβάνουν διάφορες περίπλοκες διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της υγροποίησης, των τερματικών επαναεριοποίησης, των σημαντικών παραλλαγών στις πρακτικές παραγωγής ανάντη και ενός διαφορετικού στόλου δεξαμενόπλοιων LNG, καθένα με τα μοναδικά χαρακτηριστικά του. Κατά συνέπεια, οι εκπομπές κατά μήκος του τμήματος WTT της αλυσίδας αξίας αποτελούν μια πιο σημαντική πρόκληση για τυποποίηση σε ολόκληρο τον κλάδο.

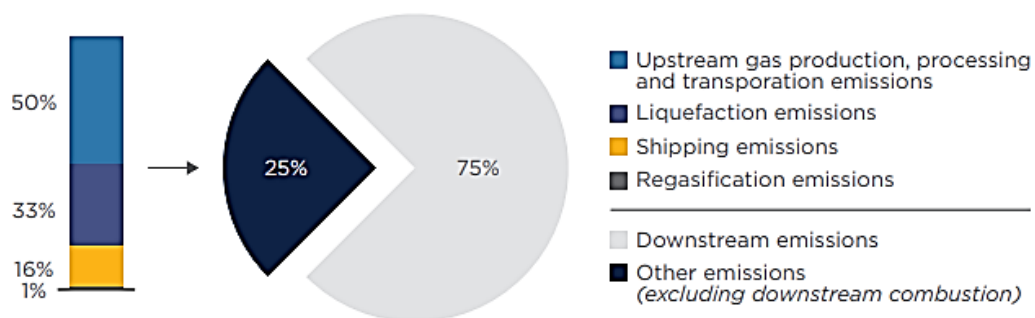
Οι εκπομπές σε όλη την αλυσίδα αξίας WTT προέρχονται από τις ακόλουθες διαδικασίες (American Petroleum Institute, 2015):

- Εκπομπές που σχετίζονται με την καύση (διαφορετικές από την καταντή καύση): Εκπομπές που προκύπτουν από εξοπλισμό καυσίμου, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης καυσίμου σε κινητήρες ή στροβίλους που παρέχουν ισχύ για συμπίεση αερίου, άντληση υγρών, παραγωγή ενέργειας, καθώς και καύσιμο που χρησιμοποιείται για θερμαντήρες και λέβητες σε διάφορες δραστηριότητες από την υγροποίηση έως τη φόρτωση, τη ναυτιλία και την επαναεριοποίηση.
- Εκπομπές εξαέρωσης: Σκόπιμες εκλύσεις μεθανίου (CH<sub>4</sub>) ή/και CO<sub>2</sub>, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών διεργασιών όπου τα ρεύματα αερίου που απελευθερώνονται δεν ανακτώνται ή δεν ανακατευθύνονται πίσω στο σύστημα αερίων καυσίμου. Αυτή η κατηγορία καλύπτει επίσης λειτουργίες όπως η εξαέρωση από συμπιεστές ή άλλο εξοπλισμό κατά τη συντήρηση. Η κατηγορία περιλαμβάνει επιπλέον όλες τις διαρροές φυσικού αερίου και την εξαέρωση έκτακτης ανάγκης.
- Εκπομπές διαρροών: Εκπομπές που συμβαίνουν ακούσια και δεν μπορούν εύλογα να περάσουν μέσα από ένα στόμιο εξάτμισης, καμινάδα, αεραγωγό ή παρόμοια ανοίγματα. Αυτό περιλαμβάνει διαρροές από εξαρτήματα σωληνώσεων και άλλο εξοπλισμό, που συχνά αναφέρονται ως διαρροές μεθανίου ή ολίσθηση (methane slip).
- Εκπομπές που σχετίζονται με τις μεταφορές: Εκπομπές που σχετίζονται με τις λειτουργίες των υπηρεσιών μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων πλοίων, φορτηγίδων και βυτιοφόρων, μαζί με μεταφορές σε αγωγούς μεταφοράς ή διανομής.
- Εκπομπές εκτός ρουτίνας: Οι μη συνήθεις εκπομπές που σχετίζονται με λειτουργίες LNG και προκύπτουν κυρίως από εκκίνηση, τερματισμό λειτουργίας ή αναταραχές εγκαταστάσεων.

Κάθε στάδιο της αλυσίδας αξίας WTT (παραγωγή, επεξεργασία, υγροποίηση, αποθήκευση, φόρτωση και εκφόρτωση, μεταφορά και επαναεριοποίηση) πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις εκπομπές από αυτές τις διεργασίες και τις έμμεσες εκπομπές από τη χρήση εισαγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας στην αλυσίδα αξίας. Για παράδειγμα, κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση φορτίων LNG, οι πηγές εκπομπών περιλαμβάνουν εκπομπές καύσης από εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας την οποία παρέχουν στις αντλίες φορτίου ενός πλοίου, εξαερισμό όταν διακόπτεται η σύνδεση φόρτωσης πλοίου και οι συνδέσεις με φορτηγίδες ή φορτηγά, καθώς και εκπομπές από βαλβίδες, φλάντζες σωληνώσεων και εξαρτήματα.



Εικόνα 7: Αλυσίδα αξίας LNG που αποτελείται από την παραγωγή φυσικού αερίου, την υγροποίηση και την αποθήκευση, τη μεταφορά μέσω πλοίων και τέλος την λήψη, την επαναεριοποίηση και τη διανομή (Econnect, 2020)



Εικόνα 8: Ένταση άνθρακα της εφοδιαστικής αλυσίδας LNG (Blanton, et al., 2021)

### 2.1.3 Κατάσταση πρακτικής LNG ως καυσίμου σε πλοία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία υφίσταται μετασχηματισμό καθώς το LNG προσεγγίζεται ως μια καθαρότερη εναλλακτική λύση έναντι των παραδοσιακών καυσίμων πλοίων. Αυτός ο μετασχηματισμός αντιπροσωπεύει την κατάσταση της πρακτικής, με αυξανόμενους αριθμούς πλοίων και λιμένων που υιοθετούν το LNG ως πηγή καυσίμου. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της κατάστασης πρακτικής είναι:

- Πλοία που κινούνται με LNG

Ποσοστά υιοθέτησης LNG ως καυσίμου: Η κατάσταση της πρακτικής στις θαλάσσιες μεταφορές δείχνει μια αυξανόμενη τάση στην υιοθέτηση πλοίων που κινούνται με LNG. Αυτά τα πλοία είναι εξοπλισμένα με κινητήρες διπλού καυσίμου που μπορούν να λειτουργούν τόσο με LNG όσο και με συμβατικά καύσιμα πλοίων.

Διαφορετικές εφαρμογές: Το LNG χρησιμοποιείται σε διάφορους ναυτιλιακούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων μεταφορών εμπορευματοκιβωτίων, των επιβατηγών πλοίων, των κρουαζιερόπλοιων, ακόμη και των υπεράκτιων πλοίων υποστήριξης. Αυτή η ποικιλομορφία υπογραμμίζει την προσαρμοστικότητα του LNG ως καυσίμου πλοίων.

Μείωση εκπομπών: Οι κινητήρες που κινούνται με LNG μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO<sub>x</sub>), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και σωματιδίων, ευθυγραμμιζόμενοι με τους αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Αυτή η υιοθέτηση καθοδηγείται από την ανάγκη συμμόρφωσης με ολοένα και πιο αυστηρά πρότυπα εκπομπών.

- Ανάπτυξη Υποδομών

Εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού καυσίμων: Μεγάλα λιμάνια σε όλο τον κόσμο επενδύουν σε υποδομές ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου. Αυτή η εξέλιξη διασφαλίζει ότι τα πλοία που κινούνται με LNG μπορούν να ανεφοδιάζονται αποτελεσματικά με καύσιμα κατά τη διάρκεια του ελλιμενισμού, αντανακλώντας την κατάσταση της πρακτικής για την υιοθέτηση LNG.

Εφοδιαστική αλυσίδα LNG: Η δημιουργία μιας ισχυρής αλυσίδας εφοδιασμού LNG, συμπεριλαμβανομένων των εγκαταστάσεων υγροποίησης, των δικτύων μεταφοράς και των εγκαταστάσεων αποθήκευσης, είναι κρίσιμη για την αξιόπιστη διαθεσιμότητα του LNG ως καυσίμου πλοίων. Αυτή η υποδομή αναπτύσσεται ενεργά για να υποστηρίξει την υιοθέτηση LNG.

Ρυθμιστικά πλαίσια: Οι κυβερνήσεις και οι ρυθμιστικοί φορείς εκπονούν ενεργά πρότυπα και κανονισμούς ασφάλειας για να διέπουν τη χρήση και τη μεταφορά LNG στον ναυτιλιακό

τομέα. Αυτά τα πλαίσια αντικατοπτρίζουν την κατάσταση της πρακτικής για τη διασφάλιση ασφαλούς και υπεύθυνης χρήσης LNG.

Η χρήση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) ως καυσίμου στον ναυτιλιακό τομέα έχει σημειώσει σημαντικές εξελίξεις και διαρκώς αυξάνεται. Η DNV<sup>1</sup> αναφέρει ότι το 2022, υπήρχαν 355 πλοία με κινητήρα LNG σε λειτουργία και 222 παραγγελίες για πλοία που θα κινούνται με LNG (η αντίστοιχη αναφορά για το 2021 ήταν 240 παραγγελίες). Με βάση τις υπάρχουσες παραγγελίες, προβλέπεται ότι ο αριθμός των πλοίων με καύσιμα LNG θα φτάσει τα 876 μέχρι το τέλος αυτής της δεκαετίας. Ο στόλος των πλοίων αυτών περιλαμβάνει δεξαμενόπλοια αργού πετρελαίου που κινούνται με LNG, οχηματαγωγά και επιβατηγά πλοία, δεξαμενόπλοια πετρελαίου/χημικών και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Παρά τις υψηλές τιμές των καυσίμων LNG τα προηγούμενα χρόνια, η ναυτιλιακή βιομηχανία συνεχίζει να επενδύει σε πλοία με καύσιμα LNG ως μέρος της πορείας προς μείωση των GHGs (IIF IIR, 2023).

Το LNG ως καύσιμο πλοίων μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) στον ναυτιλιακό τομέα έως και 23% σε σύγκριση με το μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (VLSFO), όταν αξιολογείται σε βάση πλήρους κύκλου ζωής "Well-to-Wake". Αυτό αντιπροσωπεύει ολόκληρη τη διαδικασία παραγωγής, παράδοσης και χρήσης καυσίμων επί των πλοίων, συμπεριλαμβανομένων όλων των παραγόμενων εκπομπών. Η πρόταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής FuelEU στο πλαίσιο της δέσμης «Fit for 55» στοχεύει στην επιτάχυνση της απαλλαγής από τον άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας μέσω της υιοθέτησης καυσίμων και τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και χαμηλών εκπομπών άνθρακα (European Commission, 2023). Αυτή η πρόταση περιλαμβάνει ολοένα και πιο αυστηρά όρια στην ένταση άνθρακα που χρησιμοποιούν τα πλοία από το 2025. Το LNG δίνει τη δυνατότητα στα πλοία να συμμορφώνονται με αυτούς τους στόχους μείωσης GHG που προτείνονται βάσει της νομοθεσίας έως το 2035, και με τη χρήση ενός μείγματος βιο-LNG σε ποσοστό 20% μπορεί να ανταποκριθεί στη συμμόρφωση πέραν του 2040 (IIF IIR, 2021).

Επί του παρόντος, λιγότερο από το 1% του παγκόσμιου στόλου τροφοδοτείται με LNG, αλλά αυτό το ποσοστό αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά. Η τεχνολογία LNG είναι καλά ανεπτυγμένη και ένας αυξανόμενος αριθμός πλοίων κατασκευάζεται ή μετασκευάζεται για χρήση LNG.

---

<sup>1</sup> Εταιρεία ναυτιλιακής ταξινόμησης και παροχής συμβουλών

## GROWTH OF LNG-FUELLED FLEET



Εικόνα 9: Ανάπτυξη του στόλου που τροφοδοτείται με LNG (IIF IIR, 2023)

### 2.1.4 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις LNG ως καυσίμου σε πλοία

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) ως ναυτιλιακό καύσιμο προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, αλλά αντιμετωπίζει επίσης μια σειρά προκλήσεων που επηρεάζουν τη βιωσιμότητά του στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι (BUREAU VERITAS, 2022):

- Μειωμένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου: Ο ρόλος του LNG στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου είναι σημαντικός, ιδιαίτερα όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub>. Σύμφωνα με μια μελέτη από τη thinkster που ανατέθηκε από τη SEA\LNG και την SGMF, η χρήση LNG ως καύσιμο πλοίων μπορεί να οδηγήσει σε μειώσεις GHG έως και 23% σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής (WtW) (SGMF, 2021).
- Τήρηση ρυθμιστικών προτύπων: Η ώθηση του IMO προς τη μείωση των εκπομπών από τη ναυτιλία αποτελεί κινητήρια δύναμη πίσω από την υιοθέτηση του LNG. Το LNG βοηθά τα πλοία να πληρούν τους αυστηρούς κανονισμούς του IMO 2020 για τις εκπομπές θείου.
- Ενεργειακή απόδοση: Το LNG προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα πλοίων, συμβάλλοντας σε μειωμένο λειτουργικό κόστος μακροπρόθεσμα.

Προκλήσεις του LNG ως καυσίμου (BUREAU VERITAS, 2022):



- Έξοδα αρχικής επένδυσης και μετασκευής: Η μετάβαση στο LNG απαιτεί σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου, ειδικά για τη μετασκευή υφιστάμενων σκαφών. Το κόστος και η πολυπλοκότητα της ενοποίησης συστημάτων LNG αποτελούν σημαντικό εμπόδιο για πολλές ναυτιλιακές εταιρείες.
- Παραγωγή LNG και εκπομπές κύκλου ζωής: Ενώ το LNG είναι καθαρότερο καύσιμο από τα παραδοσιακά καύσιμα πλοίων, η διαδικασία παραγωγής του, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης και της υγροποίησης, συμβάλλει στις εκπομπές GHG. Αυτή η πτυχή απαιτεί μια ολοκληρωμένη ανάλυση για την κατανόηση των πραγματικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του LNG.
- Διαφυγή μεθανίου (slip methane) και περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Η «ολίσθηση μεθανίου», η απελευθέρωση άκαυτου μεθανίου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καύσης, παραμένει σημαντική περιβαλλοντική ανησυχία. Απαιτούνται προηγμένες τεχνολογίες για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος.
- Προκλήσεις ανάπτυξης υποδομής: Η οικοδόμηση ενός παγκόσμιου δικτύου εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού LNG είναι ένα σημαντικό εγχείρημα. Αυτό απαιτεί όχι μόνο οικονομικές επενδύσεις αλλά και συνεργασία μεταξύ διαφόρων ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων των λιμενικών αρχών, των προμηθευτών καυσίμων και των ναυτιλιακών εταιρειών.
- Θέματα γεωπολιτικής και εφοδιαστικής αλυσίδας: Η διαθεσιμότητα LNG υπόκειται σε γεωπολιτική δυναμική, καθώς τα αποθέματα φυσικού αερίου συγκεντρώνονται σε ορισμένες περιοχές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε τρωτά σημεία της εφοδιαστικής αλυσίδας και διακυμάνσεις των τιμών.
- Τεχνική και επιχειρησιακή εκπαίδευση: Η λειτουργία πλοίων με καύσιμα LNG απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και δεξιότητες. Η εκπαίδευση του πληρώματος και η ανάπτυξη επιχειρησιακών κατευθυντήριων γραμμών είναι απαραίτητα για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας.
- Ρυθμιστική εξέλιξη: Το ρυθμιστικό τοπίο για το LNG ως καύσιμο πλοίων εξακολουθεί να εξελίσσεται. Οι συνεχείς ενημερώσεις των διεθνών και εθνικών κανονισμών μπορεί να επηρεάσουν την υιοθέτηση και τη λειτουργία πλοίων με καύσιμα LNG.
- Ανταγωνισμός με άλλα εναλλακτικά καύσιμα: Το LNG ανταγωνίζεται άλλα αναδυόμενα εναλλακτικά καύσιμα όπως το υδρογόνο και η αμμωνία. Η επιλογή του καυσίμου επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, της διαθεσιμότητας και της τεχνολογικής ετοιμότητας.

Συμπερασματικά, το LNG ξεχωρίζει ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για τη μείωση των εκπομπών στον ναυτιλιακό τομέα, με την αποδεδειγμένη τεχνολογία και την αναπτυσσόμενη υποδομή του. Ωστόσο, οι προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά την ολίσθηση μεθανίου, την ανάπτυξη υποδομών και την ανάγκη για ολιστική αξιολόγηση των εκπομπών του κύκλου ζωής, υπογραμμίζουν ότι το LNG αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου φάσματος λύσεων που απαιτούνται για την απεξάρτηση από τον άνθρακα της ναυτιλίας. Η εξισορρόπηση αυτών των πλεονεκτημάτων και προκλήσεων είναι ζωτικής σημασίας για τις ναυτιλιακές εταιρείες καθώς πλοηγούνται στη μετάβαση σε πιο βιώσιμες επιλογές καυσίμων.

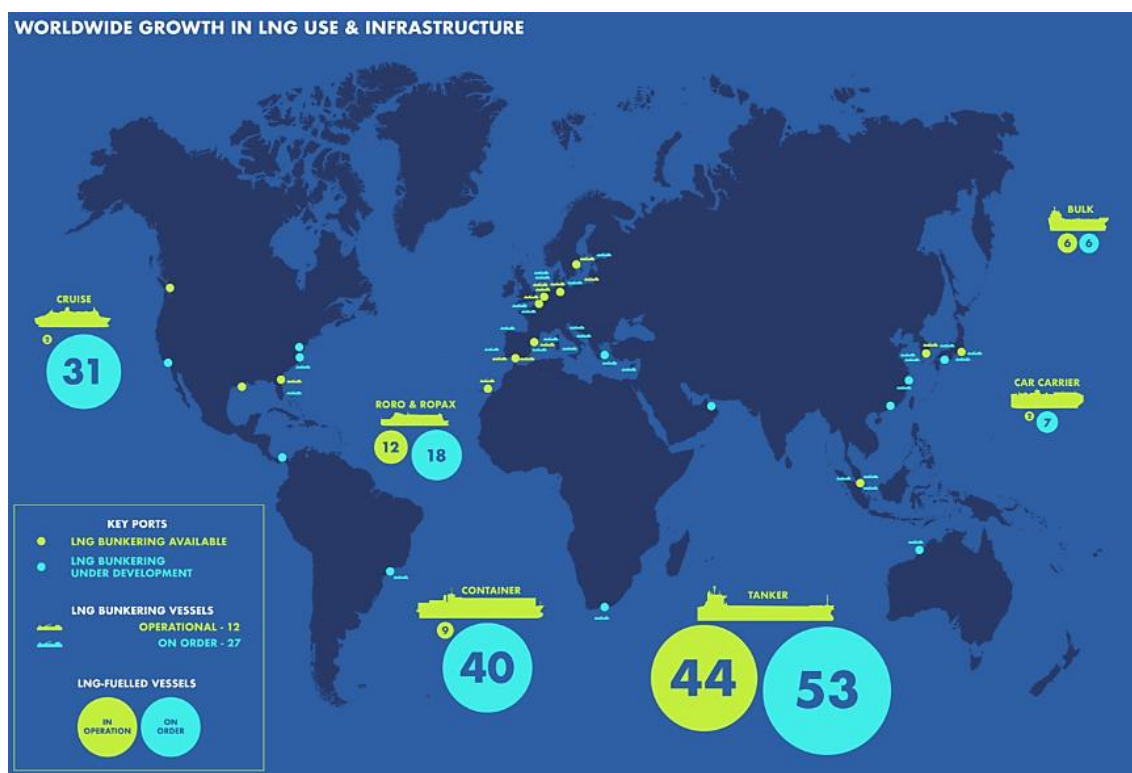
### 2.1.5 Υποδομές και εφοδιαστική αλυσίδα LNG

#### Εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού LNG

Οι εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου αποτελούν τον βασικό άξονα του δικτύου υποδομής LNG. Αυτές οι στρατηγικά τοποθετημένες εγκαταστάσεις, που είναι σε μεγάλα λιμάνια σε όλο τον κόσμο, χρησιμεύουν ως βάση για τα πλοία που κινούνται με LNG. Αξιοσημείωτα λιμάνια όπως η Σιγκαπούρη, το Ρότερνταμ, το Χιούστον και άλλα έχουν επενδύσει πολλά στην ανάπτυξη υποδομής ανεφοδιασμού LNG τελευταίας τεχνολογίας. Αυτό περιλαμβάνει τόσο χερσαίες όσο και υπεράκτιες εγκαταστάσεις, εξασφαλίζοντας μια απρόσκοπτη διαδικασία ανεφοδιασμού για πλοία όλων των μεγεθών και τύπων.

- **Επέκταση τερματικών εξαγωγών LNG:** Υπάρχει έντονη ζήτηση για εξαγωγές LNG, η οποία αναμένεται να εδραιώσει τη θέση των ΗΠΑ στην παγκόσμια αγορά φυσικού αερίου. Αυτή η ζήτηση οδήγησε σε προετοιμασίες για το άνοιγμα 10 νέων τερματικών LNG κατά μήκος της ακτογραμμής της Βόρειας Αμερικής. Αυτές οι εξελίξεις αναμένεται να υπερδιπλασιάσουν την εξαγωγική ικανότητα LNG έως το 2027, αυξάνοντας από 11,4 Bcf/ημέρα σε 24,3 Bcf/ημέρα. Η πλειονότητα αυτών των έργων βρίσκεται στις ΗΠΑ, με πρόσθετη χωρητικότητα στον Καναδά και το Μεξικό (Hart Energy, 2024).
- **Ανάπτυξη στα λιμάνια ανεφοδιασμού LNG:** Η υποδομή ανεφοδιασμού για το LNG ως καύσιμο πλοίων επεκτείνεται ταχέως. Σύμφωνα με πρόσφατες αναφορές, το LNG μπορεί πλέον να ανεφοδιαστεί σε περίπου 96 λιμάνια παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων μεγάλων κόμβων ανεφοδιασμού καυσίμων πλοίων. Επιπλέον, 55 ακόμη λιμάνια βρίσκονται στη διαδικασία δημιουργίας δυνατοτήτων ανεφοδιασμού LNG. Αυτή η επέκταση αντιπροσωπεύει

μια σημαντική αύξηση στις εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού από πλοίο σε πλοίο για LNG (SEA-LNG, 2023).



Εικόνα 10: Παγκόσμια ανάπτυξη στη χρήση και στις υποδομές LNG (SEA-LNG, 2023)

Αυτή η ανάπτυξη στις εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης στροφής στη ναυτιλιακή βιομηχανία προς πιο φιλικές προς το περιβάλλον επιλογές καυσίμων. Το LNG είναι επί του παρόντος η κυρίαρχη εναλλακτική επιλογή καυσίμου και η υποδομή του μπορεί ενδεχομένως να προσαρμοστεί για την παροχή καυσίμων μηδενικών εκπομπών άνθρακα όπως υγροποιημένο βιομεθάνιο (LBM) ή υγροποιημένο συνθετικό μεθάνιο (LSM) στο μέλλον. Αυτή η προσαρμοστικότητα καθιστά το LNG βασικό παράγοντα στη μετάβαση σε μια ναυτιλιακή βιομηχανία χωρίς άνθρακα.

Οι εγκαταστάσεις τερματικών σταθμών LNG στην Ευρώπη έχουν σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, που χαρακτηρίζεται από αύξηση τόσο του αριθμού όσο και της χωρητικότητας των τερματικών σταθμών. Σύμφωνα με πρόσφατες αναφορές, η Ευρώπη φιλοξενεί 29 τερματικούς σταθμούς LNG, συμπεριλαμβανομένων 6 που ταξινομούνται ως μικρής κλίμακας. Αυτοί οι τερματικοί σταθμοί διαθέτουν συλλογικά μια σημαντική ικανότητα αποστολής περίπου 227 δισεκατομμυρίων κυβικών μέτρων ετησίως (bcm/γ).

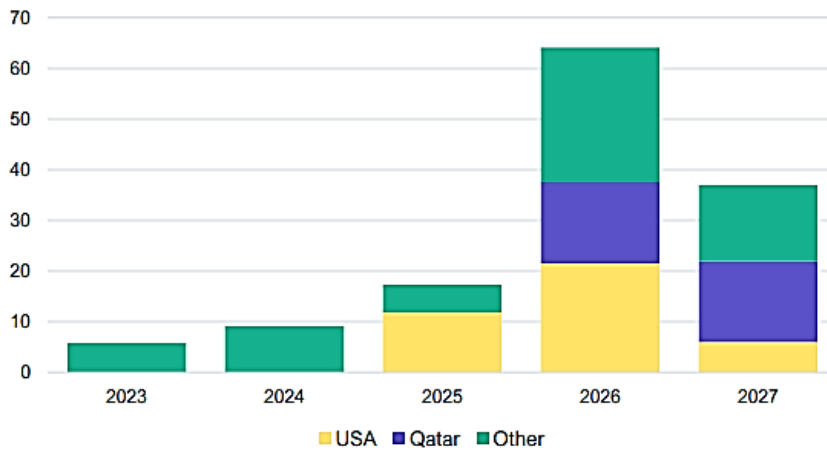
Αυτή η ανάπτυξη στις υποδομές LNG αντανακλά μια ευρύτερη τάση προς μεγαλύτερη εξάρτηση από το LNG σε ολόκληρη την ήπειρο. Η ανάπτυξη νέων τερματικών σταθμών LNG, τόσο μεγάλης όσο και μικρής κλίμακας, επιδιώκεται σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. Αυτά τα έργα υπογραμμίζουν τη δέσμευση της περιοχής να διαφοροποιήσει τις πηγές ενέργειας και να ενισχύσει την ενεργειακή ασφάλεια.

Ωστόσο, η επέκταση και ο εκσυγχρονισμός της υποδομής LNG απαιτούν ένα ευνοϊκό επενδυτικό κλίμα και ρυθμιστική σταθερότητα. Για να συνεχίσει η επιχείρηση τερματικών σταθμών LNG να προσελκύει επενδύσεις και να αναπτύσσει νέες υπηρεσίες, είναι σημαντικό να διατηρηθεί ένα σταθερό και υποστηρικτικό ρυθμιστικό περιβάλλον. Αυτό περιλαμβάνει σαφείς και συνεπείς πολιτικές που ενθαρρύνουν τις επενδύσεις σε τεχνολογίες και υποδομές LNG, καλύπτοντας τόσο τις τρέχουσες ενεργειακές ανάγκες όσο και τους μακροπρόθεσμους στόχους βιωσιμότητας.

Η επέκταση των τερματικών σταθμών LNG και η ανάπτυξη νέων έργων είναι καθοριστικής σημασίας για τη μετάβαση της Ευρώπης σε καθαρότερες πηγές ενέργειας και για την επίτευξη των στόχων της ενεργειακής ασφάλειας και του περιβάλλοντος. Η συνεχής ανάπτυξη αυτού του τομέα εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα ευνοϊκών επενδυτικών συνθηκών και ενός σταθερού ρυθμιστικού πλαισίου, τα οποία είναι απαραίτητα για την προώθηση της καινοτομίας και τη διασφάλιση της ανθεκτικότητας των ενεργειακών συστημάτων της Ευρώπης.



Εικόνα 11: Οι υπάρχοντες σταθμοί LNG στην Ευρώπη (Gas Infrastructure Europe, 2018)



Εικόνα 12: Προβλεπόμενη αύξηση ικανότητας υγροποίησης (mtpa) 2023-27 (Alam, et al., 2023)

### Πλοία αποθήκευσης LNG

Η ναυτιλιακή βιομηχανία βασίζεται σε εξειδικευμένα πλοία καυσίμων LNG για να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ χερσαίων εγκαταστάσεων και πλοίων στη θάλασσα. Αυτά τα πλοία έχουν σχεδιαστεί σχολαστικά για τη μεταφορά LNG, εξασφαλίζοντας συνεχή και αξιόπιστη παροχή καυσίμου κατά τη διάρκεια μεγάλων ταξιδιών. Η αυξανόμενη ζήτηση για LNG ως καύσιμο πλοίων έχει ωθήσει την κατασκευή ενός αυξανόμενου αριθμού αυτών των προηγμένων πλοίων καυσίμων, ενισχύοντας την προσβασιμότητα και την ευελιξία των εργασιών ανεφοδιασμού με LNG.

- Ανάπτυξη του στόλου πλοίων ανεφοδιασμού LNG: Ο αριθμός των πλοίων ανεφοδιασμού LNG αναμένεται να ξεπεράσει τα 50 πλοία μέχρι το 2024. Αυτή η ανάπτυξη οφείλεται στην αυξανόμενη ζήτηση για LNG ως καύσιμο πλοίων, η οποία αναμένεται να αυξηθεί σε 30 εκατομμύρια τόνους έως το 2030. Περιφέρειες όπως η Ασία, η Ευρώπη και η Βόρεια Αμερική επενδύουν σε πλοία μεγαλύτερης χωρητικότητας για τον ανεφοδιασμό του διευρυνόμενου στόλου που κινείται με φυσικό αέριο (Snyder, 2022).
- Νέα πλοία ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου από τη Seaspan: Η Seaspan Energy με έδρα το Βανκούβερ δρομολόγησε το πρώτο από τα τρία πλοία ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου 7600 m<sup>3</sup>, το "Seaspan Garibaldi". Από αυτή τη σειρά πλοίων, θα παραδοθούν τα δύο πρώτα πλοία το 2024 και το τρίτο το 2025. Αυτά τα πλοία κατασκευάζονται από την κινεζική ναυπηγική εταιρεία CIMC Sinopacific Offshore & Engineering. Το «Seaspan Garibaldi» θα έχει έδρα στην περιοχή του Παναμά, με το δεύτερο σκάφος να στοχεύει στην υποστήριξη της αναπτυσσόμενης αγοράς της Δυτικής Ακτής (Shipping Telegraph, 2024).

### Παραγωγή και αποθήκευση LNG στην ξηρά

Στον πυρήνα της αλυσίδας εφοδιασμού LNG βρίσκονται οι χερσαίες εγκαταστάσεις παραγωγής και αποθήκευσης LNG. Αυτά τα βασικά στοιχεία υποδομής είναι υπεύθυνα για την υγροποίηση του φυσικού αερίου και την αποθήκευση του σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Μεγάλης κλίμακας εργοστάσια παραγωγής LNG και εκτεταμένες δεξαμενές αποθήκευσης έχουν κατασκευαστεί στρατηγικά για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση για LNG ως καύσιμο πλοίων. Αυτές οι εγκαταστάσεις εξασφαλίζουν σταθερό εφοδιασμό LNG, υποστηρίζοντας τη μετάβαση της ναυτιλιακής βιομηχανίας σε καθαρότερες πηγές ενέργειας.

- **Επέκταση στην παραγωγή:** Η παγκόσμια προσφορά LNG αναμένεται να αυξηθεί, με τις ΗΠΑ να διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο. Συγκεκριμένα, οι ΗΠΑ πρόκειται να αντιμετωπίσουν αύξηση στις εξαγωγές LNG λόγω της έναρξης λειτουργίας νέων έργων υγροποίησης. Το Freeport LNG στις ΗΠΑ, το οποίο αντιμετώπισε διακοπές, αναμένεται να επιστρέψει σε λειτουργία, ενισχύοντας περαιτέρω την παραγωγική ικανότητα. Επιπλέον, αρκετά νέα έργα υγροποίησης σε όλο τον κόσμο ξεκινούν τη λειτουργία τους, συμβάλλοντας στη συνολική αύξηση της προσφοράς LNG (BloombergNEF, 2024).
- **Νέα έργα στις ΗΠΑ:** Στις Ηνωμένες Πολιτείες, αναμένεται σημαντική ανάπτυξη με την εισαγωγή νέων έργων. Αυτά περιλαμβάνουν τον τερματικό σταθμό LNG Plaquemines της Venture Global στη Λουιζιάνα και την επέκταση της Cheniere, του εργοστασίου LNG Corpus Christi στο Τέξας. Αυτά τα έργα προβλέπεται να προσθέσουν σημαντική χωρητικότητα στην υπάρχουσα ικανότητα εξαγωγής LNG των ΗΠΑ. Μέχρι το τέλος του 2024, θα μπορούσαν να προστεθούν περίπου 8,4 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι ετησίως νέας χωρητικότητας, η οποία αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω το 2025 (Paul, 2023).
- **Προοπτικές παγκόσμιας ζήτησης και αποθήκευσης:** Η ζήτηση για LNG προβλέπεται να συνεχίσει την ανοδική της τάση. Η Ασία, ιδιαίτερα η Κίνα, αναμένεται να πρωτοστατήσει στην αύξηση της ζήτησης LNG. Στην Ευρώπη, παρά τις προσπάθειες για μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, οι εισαγωγές και τα επίπεδα αποθήκευσης LNG παραμένουν ζωτικής σημασίας για την ενεργειακή ασφάλεια. Η ευρωπαϊκή αποθήκευση φυσικού αερίου αναμένεται να είναι σχεδόν πλήρης μέχρι το τέλος του καλοκαιριού του 2024, υποστηριζόμενη από τις αυξημένες εισαγωγές LNG και τις χαμηλότερες δραστηριότητες συντήρησης στη Νορβηγία. Η Νοτιοανατολική Ασία και η Νότια Ασία προβλέπεται επίσης να συμβάλουν στην αυξανόμενη ζήτηση για LNG.

### 2.1.6 Πρόωση με LNG

Η χρήση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) ως καυσίμου στα πλοία, ήταν αρχικά δημοφιλής στα πλοία μεταφοράς LNG, το τελευταίο όμως διάστημα έχει επεκταθεί και σε άλλους τύπους πλοίων, επιβεβαιώνοντας τη εξέλιξη ναυτιλιακής βιομηχανίας προς πιο βιώσιμες και φιλικές προς το περιβάλλον επιλογές καυσίμων. Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και τα δεξαμενόπλοια υιοθετούν όλο και περισσότερο LNG, με κίνητρο τις χαμηλότερες εκπομπές θείου, σωματιδίων, οξειδίων του αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα πλοίων. Αυτή η στροφή είναι σύμφωνη με τις προσπάθειες του κλάδου να τηρήσει αυστηρότερους κανονισμούς εκπομπών και να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στο μονοπάτι της χρήσης LNG σε κινητήρες πλοίων, το LNG αποθηκεύεται σε εξειδικευμένες κρυογονικές δεξαμενές και εξατμίζεται ξανά σε αέριο πριν χρησιμοποιηθεί στους κινητήρες. Αυτοί οι κινητήρες είναι συχνά σχεδιασμοί διπλού καυσίμου, ικανοί να λειτουργούν τόσο με LNG όσο και με συμβατικά καύσιμα. Αυτή η ευελιξία είναι ζωτικής σημασίας σε περιοχές όπου η υποδομή ανεφοδιασμού LNG εξακολουθεί να αναπτύσσεται.

Το αέριο βρασμού (Boil-off gas (BOG)) είναι η εξατμισμένη μορφή του LNG που εμφανίζεται φυσικά λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το περιβάλλον. Στα πλοία, ειδικά εκείνα που μεταφέρουν LNG, το BOG είναι σύνηθες φαινόμενο. Για τη διαχείριση και την αποτελεσματική χρήση του BOG, τα πλοία είναι εξοπλισμένα με εξειδικευμένα συστήματα που είτε υγροποιούν το αέριο είτε το χρησιμοποιούν ως καύσιμο. Όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο, το BOG κατευθύνεται στους κινητήρες του πλοίου, είτε μόνο του είτε αναμειγμένο με άλλα καύσιμα, παρέχοντας έναν αποτελεσματικό τρόπο χρήσης του. Αυτή η μέθοδος βοηθά στη μείωση των εκπομπών και ενισχύει τη συνολική απόδοση καυσίμου των πλοίων που κινούνται με LNG (DNV, 2021).

Παρακάτω περιγράφονται οι εφαρμογές του LNG σε συστήματα πρόωσης με τη μορφή BOG.

### 2.1.7 Συστήματα πρόωσης με LNG

Τα συστήματα πρόωσης επηρεάζουν τα επίπεδα κεφαλαιουχικών δαπανών, τα λειτουργικά έξοδα, τις εκπομπές, το εύρος μεγέθους του πλοίου, την αξιοπιστία και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς. Πριν από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, η μόνη λύση πρόωσης για μεταφορείς LNG ήταν τα συστήματα ατμοστροβίλων που τροφοδοτούνταν από Boil-off gas και βαρύ μαζούτ. Το αυξανόμενο κόστος του μαζούτ και οι αυστηρότεροι κανονισμοί εκπομπών ώθησαν την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών εναλλακτικών λύσεων πρόωσης, συμπεριλαμβανομένων κινητήρων Dual-Fuel Diesel Electric (DFDE), Triple-Fuel Diesel Electric (TFDE) και Slow-Speed Diesel with Re-Liquefaction Plant (SSDR).

Διάφορα συστήματα πρόωσης με LNG έχουν εφαρμοστεί. Αυτά περιλαμβάνουν (International Gas Union, 2023) :

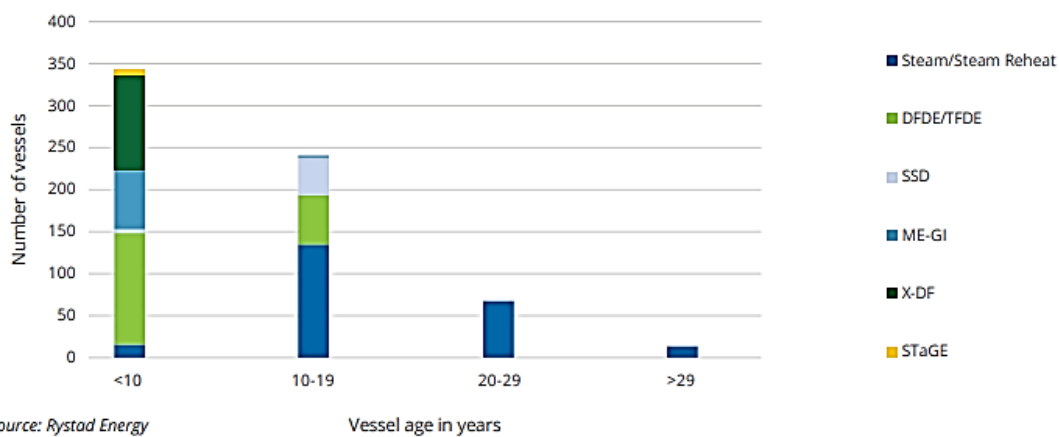
1. **Τουρμπίνες Ατμού:** Αυτό το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί από το 1960. Βασίζεται στην ιδέα της ταυτόχρονης καύσης βαρέων καυσίμων και Boil off Gas (BOG), το οποίο παράγεται κατά τη μεταφορά LNG. Το BOG τροφοδοτεί τους στροβίλους πρόωσης και τις ηλεκτρικές γεννήτριες. Από το 2003, αυτά τα συστήματα έχουν υποστεί μεταβολές, με αποτέλεσμα να αντικαθίστανται με κινητήρες εσωτερικής καύσης, λόγω της υψηλότερης αποδοτικότητάς τους. Ένα πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν απαιτεί επιπλέον μονάδα καύσης αερίου, με το BOG να χρησιμοποιείται πλήρως στους λέβητες, εξασφαλίζοντας χαμηλότερα κόστη συντήρησης και λειτουργίας.
2. **Dual-Fuel Diesel Electric (DFDE):** Τα συστήματα DFDE μπορούν να καταναλώσουν και Diesel Oil και BOG, βελτιώνοντας την απόδοση του πλοίου κατά περίπου 25-30% σε σχέση με τις παραδοσιακές τουρμπίνες ατμού. Είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης, το οποίο κινείται από κινητήρα διπλού καυσίμου. Σε λειτουργία αερίου, αυτοί οι κινητήρες κινούνται με φυσικό αέριο χαμηλής πίεσης, με μικρή ποσότητα ντίζελ να λειτουργεί ως σπινθήρας. Αυτό το σύστημα επιτρέπει ευελιξία στην καύση του BOG, προσφέροντας τη δυνατότητα για αυξημένη αποδοτικότητα και μειωμένη κατανάλωση καυσίμων.
3. **Tri-Fuel Diesel Electric (TFDE):** Αυτό το σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα κατανάλωσης τριών διαφορετικών καυσίμων: παραδοσιακό μαζούτ, ντίζελ και φυσικό αέριο (μέσω BOG). Παρέχει ευελιξία στο πλοίο, επιτρέποντάς του να βελτιώσει τις αποδόσεις του ανάλογα με τις απαιτήσεις του ταξιδιού και τις ταχύτητες.
4. **Slow-Speed Diesel (SSD) με Μονάδα Επανυγροποίησης BOG:** Αυτό το σύστημα δεν εξαρτάται από το BOG για την κίνηση, καθώς οι κινητήρες καταναλώνουν Heavy Fuel Oil ή Marine Diesel Oil. Το BOG μπορεί να επιστρέφεται πίσω στις δεξαμενές, με τη δυνατότητα καύσης του μέσω μιας μονάδας καύσης αερίου, όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Αυτή η μέθοδος προσφέρει το πλεονέκτημα της μηδενικής απώλειας φορτίου κατά τη μεταφορά του LNG.
5. **M-type, Electronically Controlled, Gas Injection (ME-GI):** Το σύστημα ME-GI παρουσιάστηκε το 2015 από την MAN B&W, πρόκειται για ένα δίχρονο σύστημα ηλεκτρονικά ελεγχόμενης έγχυσης αερίου τύπου M και έχει κάνει σημαντικά βήματα εφαρμογής για την πρόωση πλοίων μεταφοράς LNG. Ο κινητήρας χρησιμοποιεί BOG



η πίεση του οποίου φτάνει σε περίπου 350 bar, χρησιμοποιώντας παράλληλα μικρή ποσότητα ντίζελ ως πιλοτικό καύσιμο. Το σύστημα λειτουργεί βελτιστοποιώντας την απόδοση ειδικά σε μεγάλο μεγέθους μεταφορείς LNG. Έχει υιοθετηθεί ευρέως, με 72 νέες κατασκευές να έχουν παραδοθεί από το 2015 και 22 ακόμη να είναι υπό κατασκευή. Με βάση αυτό, η MAN B&W ανέπτυξε το σύστημα ME-GA, το οποίο λειτουργεί σε χαμηλότερη πίεση και είναι πιο κατάλληλο για χρήση BOG. Με χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας και μειωμένες εκπομπές NO<sub>x</sub>, το σύστημα ME-GA κερδίζει δημοτικότητα, με σημαντικό αριθμό παραγγελιών για μελλοντικές παραδόσεις. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν προσφέροντας μείωση κατανάλωσης καυσίμου κατά 15-20% σε σύγκριση με συστήματα TFDE.

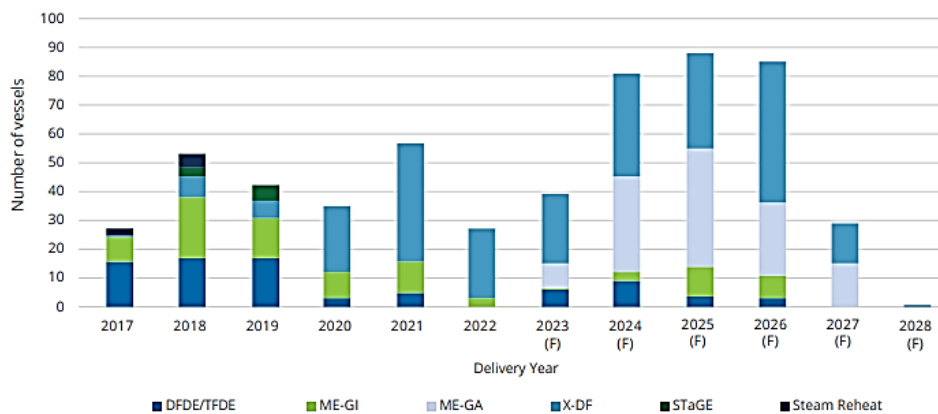
- 6. Winterthur Gas & Diesel (WinGD) Low-Pressure Two-Stroke Engine (XDF):** Το Winterthur Gas & Diesel (WinGD) X-DF, που παρουσιάστηκε από τη Wärtsilä και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο SK Audace το 2017, αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία κινητήρων πλοίων. Λειτουργεί στον κύκλο Otto, αναμιγνύοντας καύσιμο και αέρα σε υψηλή αναλογία και ψεκάζοντας το σε χαμηλή πίεση. Το σύστημα χρησιμοποιεί μικρή ποσότητα μαζούτ ως καύσιμο πιλότου κατά την καύση φυσικού αερίου. Η χαμηλή του πίεση που διατηρείται διευκολύνει την ενσωμάτωση με διάφορους προμηθευτές. Το X-DF πρώτης γενιάς, συγκρίσιμο σε απόδοση καυσίμου με τους κινητήρες ME-GI, υπερέχει σε ασφάλεια και εκπομπές, ιδιαίτερα σε εκπομπές αζώτου, χωρίς να χρειάζεται πρόσθετα συστήματα επεξεργασίας. Το 2020, η WinGD κυκλοφόρησε τη δεύτερη γενιά X-DF, η οποία μειώνει κατά το ήμισυ την ολίσθηση του μεθανίου και βελτιώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 3-5% μέσω της ανακύκλωσης των καυσαερίων, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση πάνω από 50%. Αυτή η νέα γενιά πρόκειται να ανταγωνιστεί τα συστήματα ME-GA, με 114 πλοία που χρησιμοποιούν επί του παρόντος συστήματα X-DF και 146 ακόμη κατόπιν παραγγελίας.

Στον τομέα των συστημάτων πρόωσης του στόλου, υπάρχει μια ξεχωριστή τάση που συνδέεται με την ηλικία του σκάφους. Τα παλαιότερα πλοία διαθέτουν κατά κύριο λόγο συστήματα ατμοστροβίλων, ενώ νεότερες καινοτομίες όπως τα ME-GI, ME-GA, X-DF και STaGE βρίσκονται σε πιο πρόσφατα πλοία. Τα συστήματα DFDE/TFDE και SDR είναι λιγότερο κοινά σε παλαιότερα πλοία, με το SDR να υπάρχει σε μεγάλο βαθμό στα πλοία Q-Class του Κατάρ. Κοιτάζοντας το μέλλον, το παγκόσμιο βιβλίο παραγγελιών υποδεικνύει έναν σημαντικό αριθμό συστημάτων X-DF σε επερχόμενες παραδόσεις πλοίων μέχρι το 2025, μετά το οποίο τα συστήματα ME-GA αναμένεται να γίνουν πιο εμφανή.



Source: Rystad Energy

Εικόνα 13: Τύπος πρόωσης ανά ηλικία πλοίου (τέλος Απριλίου 2023) (International Gas Union, 2023)



Εικόνα 14: Ιστορικές και μελλοντικές παραδόσεις πλοίων μεταφοράς LNG ανά τύπο πρόωσης, 2017-2028 (International Gas Union, 2023)

### 2.1.8 Χαρακτηριστικά παραδείγματα πλοίων με LNG

Η χρήση του LNG ως καυσίμου στη ναυτιλιακή βιομηχανία έχει σημειώσει σημαντική ανάπτυξη, με διάφορες ναυτιλιακές εταιρείες να επενδύουν σε πλοία με καύσιμα LNG. Μέχρι στιγμής, υπάρχουν πάνω από 1.000 πλοία που κινούνται με LNG είτε σε λειτουργία είτε σε παραγγελία, και ο αριθμός αυτός προβλέπεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια. Μεγάλες εταιρείες στον κλάδο της ναυτιλίας εμπορευματοκιβωτίων έχουν υιοθετήσει το LNG, με εταιρείες όπως η CMA CGM, η Hyundai Merchant Marine (HMM), η Harag-Lloyd, η Mediterranean Shipping Company (MSC), η Pacific International Lines (PIL) και η Yang Ming να πραγματοποιούν σημαντικές επενδύσεις σε LNG πλοία (Ship & BUInker, 2024).

Για να παρέχεται ένας ολοκληρωμένος πίνακας με λεπτομερείς πληροφορίες, όπως το όνομα κάθε πλοίου, η ιδιοκτήτρια εταιρεία του, ο τύπος και οι δυνατότητες του πλοίου, ο τύπος

κινητήρα και η πηγή, θα απαιτούσε πρόσβαση σε εξειδικευμένες βάσεις δεδομένων. Ωστόσο, μπορούμε να συνοψίσουμε τις βασικές τάσεις και τις εταιρείες που εμπλέκονται στη ναυτιλία με επενδύσεις κινητήρα LNG (Jessica Casey, 2023):

- CMA CGM: Η CMA CGM, είναι πρωτοπόρος στη χρήση LNG για την λειτουργία μεγάλων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.
- Hyundai Merchant Marine (HMM): Ξεκίνησε σχετικά νωρίς να δραστηριοποιείται στο πεδίο εφαρμογής του LNG ως καύσιμο, με παραγγελίες για οκτώ πλοία 14.000 TEU που κινούνται με LNG το 2018.
- Harag-Lloyd: Γερμανική εταιρεία που έχει κάνει σημαντικές παραγγελίες για μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έτοιμα για LNG από το 2019.
- Mediterranean Shipping Company (MSC): Ξεκίνησε να επενδύει στο LNG ως καύσιμο του στόλου της 2021.
- Pacific International Lines (PIL): Η εταιρεία παρήγγειλε νέα πλοία εξοπλισμένα με κινητήρες διπλού καυσίμου που μπορούν να λειτουργούν με LNG ή μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.
- Yang Ming: Πρόσφατα δραστηριοποιήθηκε στο LNG ανακοινώνοντας παραγγελία για πέντε πλοία LNG 15.000 TEU διπλού καυσίμου το 2023.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται εμβληματικές περιπτώσεις πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο. Τα πλοία αυτά είτε κατασκευάστηκαν εξ' αρχής να χρησιμοποιούν LNG ή πρόκειται για μετατροπές. Στις περισσότερες των περιπτώσεων τα πλοία με καύσιμο LNG όπως ήδη έχει αναφερθεί χρησιμοποιούν κινητήρες διπλού καυσίμου.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο

Όνομα Πλοίου	Εταιρεία	Κύρια χαρακτηριστικά/ TEU	Τύπος Μηχανής	Έτος	Πηγή
CMA CGM Jacques Saadé	CMA CGM Group	Το μεγαλύτερο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που κινείται με LNG στον κόσμο, 23.000 TEU	WinGD X92DF	2020	(DNV, 2021)
HMM Garam	Hyundai Merchant Marine	Φιλικό προς το περιβάλλον mega-ship, 24.000 TEU	MAN B&W 11G95ME-GI	2021	(HMM, 2024)
Hapag-Lloyd Brussels Express	Hapag-Lloyd	Μετατράπηκε σε LNG, 15.000 TEU	MAN B&W 8G95ME-GI	2020 (Conversion)	(Marine Insight, 2019)
MSC Gülsün	Mediterranean Shipping Co	Μεγάλο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που χρησιμοποιεί LNG, 23.000 TEU	WinGD X92DF	2019	(MSC, 2019)
AIDAnova	AIDA Cruises	Το πρώτο κρουαζιερόπλοιο που κινείται με LNG	Caterpillar MaK M 46 DF	2018	(Ship Technology, 2019)
Costa Smeralda	Costa Cruises	Κρουαζιερόπλοιο με κινητήρα LNG	Caterpillar MaK M 46 DF	2019	(Meyer Werft, 2023)
Sovcomflot Gagarin Prospect	Sovcomflot	Δεξαμενόπλοιο με κινητήρα LNG	WinGD X-DF	2018	(Hellenicshippingnews, 2021)
Isla Bella	TOTE Maritime	Πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με κινητήρα LNG στις ΗΠΑ, 3.100 TEU	MAN B&W 8L70ME-GI	2015	(Ship & Bunker News, 2015)
Perla Del Caribe	TOTE Maritime	Αδελφό πλοίο στο Isla Bella, 3.100 TEU	MAN B&W 8L70ME-G	2015	(Ship & Bunker News, 2015)

## 2.2 Μεθανόλη

Η μεθανόλη, που επίσης αναφέρεται ως μεθυλική αλκοόλη ή αλκοόλη ξύλου, είναι μια παγκοσμίως προσβάσιμη χημική ένωση που έχει βρει διαφορετικές εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες για αρκετές δεκαετίες. Η ευρεία χρήση της εκτείνεται από τις βιομηχανικές διεργασίες έως την παραγωγή ενέργειας, λόγω της ευελιξίας της χρήσης της. Η κυρίαρχη μέθοδος παραγωγής μεγάλης κλίμακας μεθανόλης περιλαμβάνει την καταλυτική σύνθεση από φυσικό αέριο, μια διαδικασία που είναι η συμβατική οδός εδώ και πολλά χρόνια. Ωστόσο, οι αναδυόμενες βιώσιμες πρακτικές έχουν διευρύνει τους ορίζοντες, με εναλλακτικές οδούς παραγωγής να αναπτύσσονται, όπως η παραγωγή μεθανόλης από ανανεώσιμες πηγές όπως η βιομάζα ή η χρήση ηλεκτρόλυσης που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμπληρώνεται από τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα. Αυτή η εξέλιξη στις μεθοδολογίες παραγωγής ευθυγραμμίζεται με μια παγκόσμια προσπάθεια για τη μετάβαση προς καθαρότερες, πιο πράσινες πηγές ενέργειας.

Η ενσωμάτωση αυτών των εναλλακτικών οδών παραγωγής στην κύρια παραγωγή μεθανόλης όχι μόνο σηματοδοτεί μια απομάκρυνση από την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, αλλά υπόσχεται επίσης ουσιαστικές μειώσεις στο αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που σχετίζεται με τη χρήση μεθανόλης ως καύσιμο. Αυτή η μετάβαση αντικατοπτρίζει μια προοδευτική και στρατηγική κίνηση προς πιο βιώσιμες ενεργειακές πρακτικές, ευθυγραμμισμένες με τις παγκόσμιες προσπάθειες για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές της μεθανόλης είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο στον ναυτιλιακό τομέα όπου ενδιαφερόμενοι φορείς, πλοία μικρών αποστάσεων, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια και πλοία εσωτερικής ναυσιπλοΐας έλκονται όλο και περισσότερο από τη δυνατότητά της να περιορίσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Τα πλεονεκτήματα εκτείνονται πέρα από τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, περιλαμβάνοντας πρακτικές πτυχές όπως η ευκολία αποθήκευσης και χειρισμού. Σε σύγκριση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα όπως το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) και το υδρογόνο (H<sub>2</sub>), η μεθανόλη αποδεικνύεται μια πιο διαχειρίσιμη και φιλική προς τον χρήστη επιλογή.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθανόλης έγκειται στις φυσικές της ιδιότητες. Είναι άχρωμο υγρό σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, συνοδευόμενο από μια χαρακτηριστική οσμή.

Η αποτελεσματικότητά της στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών ανησυχιών είναι πολύπλευρη. Όχι μόνο διαθέτει την υψηλότερη αναλογία υδρογόνου-άνθρακα μεταξύ των υγρών καυσίμων, υποδηλώνοντας τη δυνατότητα για μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την

καύση, αλλά επιδεικνύει επίσης μια αξιοσημείωτη φιλική προς το περιβάλλον πτυχή όσον αφορά τη βιοδιασπασιμότητα. Τόσο σε αερόβιο όσο και σε υδάτινο περιβάλλον, η μεθανόλη υφίσταται εύκολα βιοαποικοδόμηση, ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε περίπτωση διαρροής. Ο σύντομος χρόνος ημιζωής της στα επιφανειακά ύδατα συμβάλλει περαιτέρω στην οικολογική ανθεκτικότητα, με τις επιπτώσεις της να μειώνονται σε διάστημα μίας έως επτά ημερών.

Ωστόσο, στην επιδίωξη μιας συνολικής αξιολόγησης της βιωσιμότητας της μεθανόλης ως πηγής καυσίμου, καθίσταται επιτακτική ανάγκη να εμβαθύνουμε στα ενεργειακά της χαρακτηριστικά. Παρά τα αμέτρητα πλεονεκτήματά της, εμφανίζει ειδική ενεργειακή αξία 19.700 kJ/kg, μια παράμετρος σημαντικά χαμηλότερη από αυτή του LNG και των συμβατικών υγρών καυσίμων. Κατά συνέπεια, για να επιτευχθεί ισοδύναμο ενεργειακό περιεχόμενο, η μεθανόλη απαιτεί μεγαλύτερο όγκο αποθήκευσης, περίπου 2.54 φορές περισσότερο από τα συμβατικά καύσιμα. Αυτός ο παράγοντας απαιτεί μια διαφοροποιημένη αξιολόγηση κατά τη σύγκριση της μεθανόλης με το LNG, λαμβάνοντας υπόψη πτυχές όπως η συνολική ογκομετρική πυκνότητα, στοιχεία συσκευασίας για κυλινδρικές δεξαμενές, παράγοντες μόνωσης και πλήρωσης, αέριο βρασμού και απώλειες μεταφοράς φύλαξης (Wissner, et al., 2023).

### 2.2.1 Παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο.

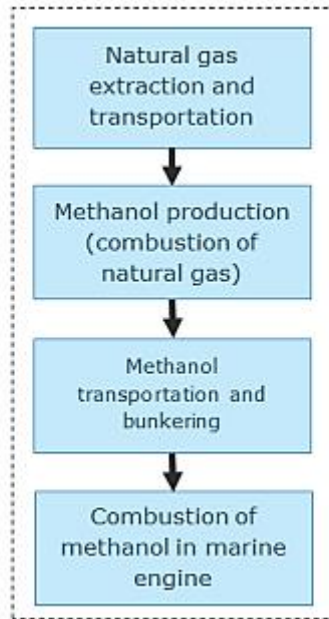
Η παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο είναι μια πολύπλευρη διαδικασία που περιλαμβάνει αναμόρφωση ατμού και μερική οξειδωση, επιτυγχάνοντας κατά προσέγγιση ενεργειακή απόδοση έως και 70% (Olah, et al., 2009). Επί του παρόντος, παράγεται κυρίως με τη χρήση φυσικού (ορυκτού) αερίου, που οδηγεί στη λεγόμενη «γκρίζα μεθανόλη» με εκπομπές WtT GHG συγκρίσιμες ή ακόμη μεγαλύτερες από αυτές του Marine Gas Oil (MGO), ανάλογα με τις υποθέσεις και τις πηγές που εξετάζονται (MMKMC - Maersk Mc-Kinney Møller Center, 2021) (Sollai, et al., 2023). Για παράδειγμα, η πρωτοβουλία FuelEU Maritime αναφέρει έναν παράγοντα εκπομπής (WtT) 14.4 g CO<sub>2</sub> eq/MJ για το MGO και 31.3 g CO<sub>2</sub> eq/MJ για τη μεθανόλη που προέρχεται από φυσικό αέριο (EC - European Commission, 2021). Αξιοσημείωτες σε αυτή τη περίπτωση παραγωγής της από φυσικό αέριο, είναι οι εκπομπές που προέρχονται κυρίως από την καύση φυσικού αερίου. Η εγγενώς εξώθερμη φύση της διαδικασίας παραγωγής επιτρέπει τη χρήση της περίσσειας θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εντός της μονάδας, συμβάλλοντας στη συνολική ενεργειακή απόδοση. Επομένως, είναι λογικό να συμπεράνουμε ότι η διαδικασία παραγωγής στο εργοστάσιο

εισάγει ελάχιστες πρόσθετες εισροές ενέργειας, με τις εκπομπές πέρα από την καύση φυσικού αερίου να είναι ασήμαντες.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να επεκταθεί η ανάλυση πέρα από το εργοστάσιο παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη το ευρύτερο φάσμα των εκπομπών που πραγματοποιούνται περαιτέρω κατά μήκος της αλυσίδας αξίας (value chain). Οι εκπομπές αυτές προέρχονται από τις φάσεις εξόρυξης και μεταφοράς φυσικού αερίου, παράγοντες αναπόσπαστοι στην αλυσίδα εφοδιασμού της μεθανόλης.

Επιπλέον, κατά την οριοθέτηση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι εκπομπές που σχετίζονται με τη μεταφορά και τον ανεφοδιασμό της. Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης, αυτές οι εκπομπές θεωρείται ότι αντικατοπτρίζουν εκείνες που αντιστοιχούν στο Marine Gas Oil (MGO) και στο Heavy Fuel Oil (HFO). Ο αντίκτυπος της διαφοράς στην ενεργειακή πυκνότητα της μεθανόλης στις εκπομπές από τις μεταφορές θεωρείται αμελητέος, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετικά μικρή συμβολή των εκπομπών που σχετίζονται με τις μεταφορές σε σύγκριση με άλλες φάσεις του κύκλου ζωής της.

Η Εικόνα 14 παρουσιάζει το κύκλο ζωής της παραγωγής μεθανόλης με χρήση φυσικού αερίου, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των διασυνδεδεμένων διαδικασιών και των σχετικών εκπομπών. Αυτή η ανάλυση κύκλου ζωής χρησιμεύει ως θεμελιώδες πλαίσιο για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και της αποτελεσματικότητάς της ως πηγής καυσίμου, διευκολύνοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων εντός του ευρύτερου εξελισσόμενου τοπίου των λύσεων βιώσιμης ενέργειας για τις θαλάσσιες μεταφορές.

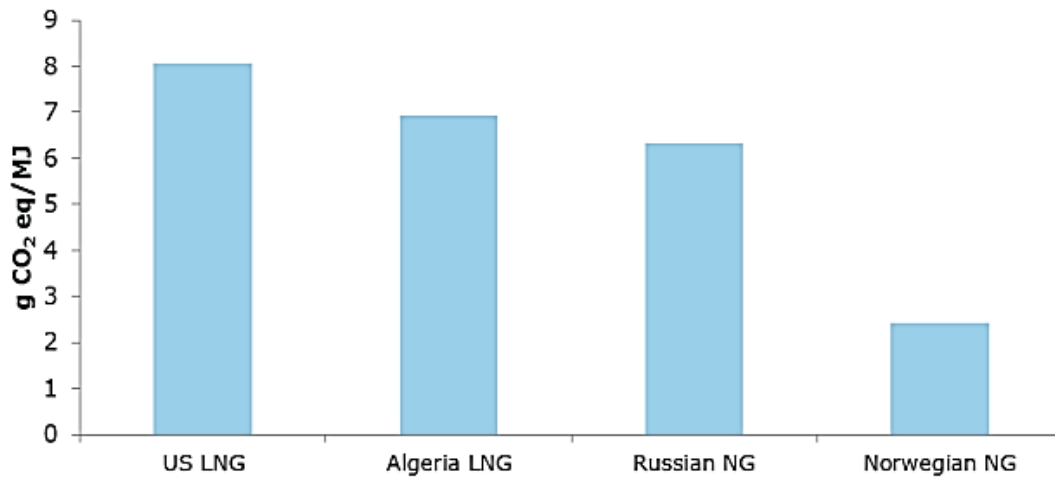


Εικόνα 15: Φάσεις του κύκλου ζωής της παραγωγής και χρήσης μεθανόλης ως καυσίμου στα πλοία (IMO, 2016)

Οι εκτιμήσεις εκπομπών προέρχονται από την Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων Κύκλου Ζωής (ELCD), με βάση την εξόρυξη φυσικού αερίου της Νορβηγίας. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη μεταφορά του φυσικού αερίου μέσω αγωγού στον τόπο παραγωγής, με αποτέλεσμα μια σωρευτική τιμή 2,4 g CO<sub>2</sub> eq/MJ φυσικού αερίου (Bengtsson, et al., 2011).

Είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωριστεί η εγγενής μεταβλητότητα στις ενεργειακές απαιτήσεις για την εξόρυξη αερίου σε διάφορα πεδία και οι διαφορετικές αποδόσεις στην επεξεργασία και τη μεταφορά αερίου. Οι διακρίσεις σε αυτούς τους παράγοντες υπογραμμίζουν την πολυπλοκότητα της διεξαγωγής μιας συγκριτικής ανάλυσης σε μελέτες αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA). Η Εικόνα 15 είναι χαρακτηριστική για την αποσαφήνιση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) που προέρχονται από την εξόρυξη φυσικού αερίου σε διάφορες τοποθεσίες, υπογραμμίζοντας έτσι το εύρος των εκπομπών που σχετίζονται με την εξόρυξη φυσικού αερίου.

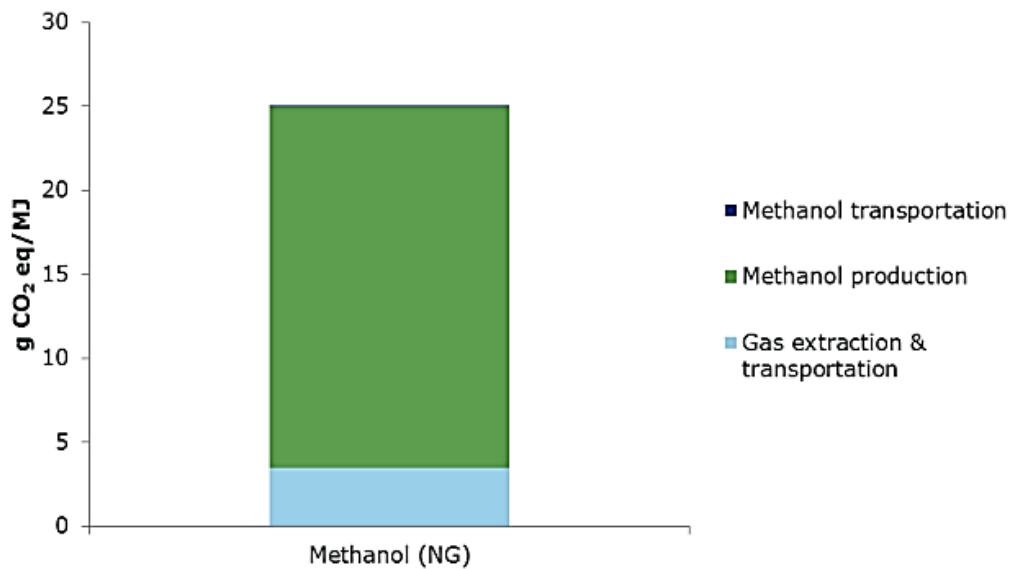




Εικόνα 16: GHG emissions of natural gas extraction (U.S. Department of Energy, National Energy Laboratory, 2014).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η Εικόνα 16 αφορά συγκεκριμένα τις εκπομπές από την εξόρυξη μόνο φυσικού αερίου, με την επισήμανση ότι το LNG συνεπάγεται πρόσθετες εκπομπές από την υγροποίηση και άλλα στάδια επεξεργασίας. Ορισμένες μελέτες επιλέγουν την παρέκταση των εκπομπών της νορβηγικής εξόρυξης φυσικού αερίου ως βάση για τον υπολογισμό των τιμών του κύκλου ζωής της παραγωγής καυσίμου όταν η παραγωγή πραγματοποιείται εντός της Ευρώπης (Bryngolf, et al., 2014).

Παρά τις εγγενείς αβεβαιότητες στον ποσοτικό προσδιορισμό των εκπομπών που σχετίζονται με την εξόρυξη και τη μεταφορά φυσικού αερίου, προκύπτει μια κρίσιμη παρατήρηση: οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με την παραγωγή μεθανόλης με χρήση φυσικού αερίου κυριαρχούνται σε συντριπτική πλειοψηφία από τις εκπομπές που προέρχονται από την καύση φυσικού αερίου στη μονάδα παραγωγής της. Αυτή η παρατήρηση παρουσιάζεται στην Εικόνα 17 ενσωματώνοντας ολόκληρο το προφίλ εκπομπών της παραγωγής μεθανόλης με φυσικό αέριο.



Εικόνα 17: Εκπομπές CO<sub>2</sub> από μεθανόλη που παράγεται με φυσικό αέριο (IMO, 2016).

### 2.2.2 Παραγωγή e-Μεθανόλης (e-methanol)

Η παραγωγή της e-μεθανόλης περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια και βασίζεται στη διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και νερό μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Ωστόσο, οι περιορισμοί των δυνατοτήτων εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας απαιτεί πρόσθετη παραγωγή για την υποστήριξη της πράσινης παραγωγής υδρογόνου (Kasten, et al., 2019). Το αέριο σύνθεσης σχηματίζεται από την αντίστροφη αντίδραση νερού-αερίου (WGSR) στους 1000 °C, χρησιμοποιώντας υδρογόνο και CO<sub>2</sub>. Παρά τις δυνατότητές του, το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας του WGSR παραμένει σχετικά χαμηλό (Heinemann, et al., 2019). Το αέριο σύνθεσης χρησιμοποιείται για τη σύνθεση μεθανόλης, με μία διαδικασία υψηλής απόδοσης περίπου 80% (Brymolof, et al., 2018) (LR - Lloyd's Register, 2019).

Η επεκτασιμότητα της παραγωγής πράσινου υδρογόνου αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για τη μελλοντική βιωσιμότητα της e-μεθανόλης στον ναυτιλιακό τομέα. Υπάρχει συνεχής διερεύνηση της άμεσης σύνθεσης μεθανόλης σε εργαστηριακή κλίμακα (Goerrert, et al., 2014) (Olah, et al., 2018). Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της e-μεθανόλης εξαρτάται από τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε όλη τη διαδικασία παραγωγής και την αιεφόρο προμήθεια εισροών CO<sub>2</sub>. Δεδομένου ότι η καύση ή η χρήση της e-μεθανόλης σε μια κυψέλη καυσίμου απελευθερώνει CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα στο τέλος του κύκλου ζωής της, υπάρχει προϋπόθεση να αποκλειστεί το ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> με την απομάκρυνσή του.

Υπάρχουν δύο βιώσιμες επιλογές για μια ανανεώσιμη πηγή CO<sub>2</sub>: η βιογενής πηγή και η εξαγωγή CO<sub>2</sub> απευθείας από τον αέρα. Οι βιογενείς πηγές CO<sub>2</sub> ενδέχεται να είναι περιορισμένες για παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Μακροπρόθεσμα, η άμεση δέσμευση (DAC) του CO<sub>2</sub> από τον αέρα θεωρείται πιο υποσχόμενη λόγω της άφθονης παρουσίας CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, το DAC είναι σχετικά ενεργοβόρο σε σύγκριση με τη δέσμευση CO<sub>2</sub> από βιομηχανικές σημειακές πηγές. Το Temperature Swing Adsorption (TSA) είναι η πιο προηγμένη τεχνολογία DAC, αλλά βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια της κλιμάκωσης. Το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας για το DAC είναι χαμηλότερο από ορισμένες άλλες τεχνολογίες, όπως ο διαχωρισμός αζώτου με κρυογονικό αέρα για παραγωγή e-αμμωνίας (Cames, et al., 2023).

Δεδομένων των ενεργειακών απωλειών στη διαδρομή παραγωγής της e-μεθανόλης, είναι επιτακτική ανάγκη να διασφαλιστεί ότι τροφοδοτείται αποκλειστικά από πρόσθετη ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (και κατά συνέπεια πράσινο υδρογόνο) και όχι από ορυκτά καύσιμα. Αυτό τονίζει τον κρίσιμο ρόλο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην υλοποίηση της βιώσιμης παραγωγής e-μεθανόλης.

### 2.2.3 Παραγωγή Βιο-μεθανόλης

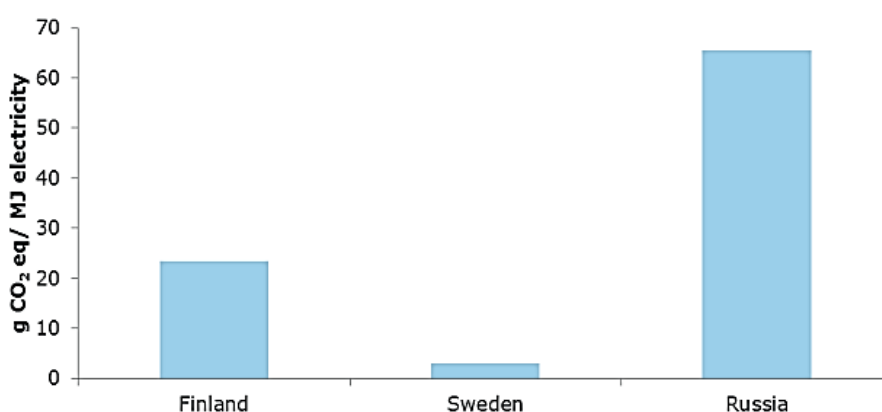
Ενώ η επικρατούσα εφαρμογή της μεθανόλης ως καυσίμου πλοίων πηγάει κυρίως από τη σύνθεση φυσικού αερίου, είναι επιτακτική ανάγκη να διευρυνθεί η συζήτηση εμβαθύνοντας στις εκπομπές του κύκλου ζωής που σχετίζονται με την παραγωγή μεθανόλης με χρήση βιομάζας. Αυτή η ανάλυση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ευθυγραμμίζεται με την εξελισσόμενη περιβαλλοντική ώθηση για μετάβαση στη βιομεθανόλη, παρουσιάζοντας μια πρόσθετη διάσταση βιωσιμότητας πέρα από την εγγενή της φύση χωρίς θείο.

Η βιομεθανόλη, που προέρχεται από βιομάζα, αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς μια πιο οικολογικά συνειδητή εναλλακτική λύση καυσίμου. Η βιομάζα, όπως τα υπολείμματα από τη δασοκομία, χρησιμεύει ως κύρια πρώτη ύλη για αυτήν τη μεθοδολογία παραγωγής. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο των εργοστασίων χαρτοπολτού και χαρτιού, τα υλικά βιομάζας χρησιμοποιούνται συμβατικά για την παραγωγή «μαύρου υγρού» - μια ουσία που συνήθως καίγεται για την παραγωγή ενέργειας και την ανάκτηση χημικών ουσιών. Ωστόσο, μια καινοτόμος προσέγγιση περιλαμβάνει την αεριοποίηση του μαύρου υγρού σε περιβάλλον πλούσιο σε οξυγόνο, επιτρέποντας έτσι την παραγωγή μεθανόλης από το προκύπτον αέριο σύνθεσης. Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει τη σύνθεση μεθανόλης χωρίς να διακυβεύεται η ταυτόχρονη ανάκτηση πολύτιμων χημικών ουσιών. Ουσιαστικά, αυτή η διαδικασία μπορεί να ενσωματωθεί απρόσκοπτα στις υφιστάμενες εργασίες εργοστασίου χαρτοπολτού και

χαρτιού, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει πρόσβαση στην πλεονάζουσα βιομάζα (Chryssakis, et al., 2015). Η επακόλουθη διαδικασία παραγωγής μεθανόλης αποτελεί τη βάση για τις επακόλουθες εκτιμήσεις του κύκλου ζωής των αερίων θερμοκηπίου (GHG) σχετικά με τη βιομεθανόλη.

Κατά την οριοθέτηση του προφίλ εκπομπών της παραγωγής βιομεθανόλης, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωρισθεί ότι οι εκπομπές προέρχονται όχι μόνο από την άμεση διαδικασία παραγωγής αλλά και από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται σε βοηθητικές διεργασίες. Η πηγή αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας αναδεικνύεται ως βασικός παράγοντας, ασκώντας βαθιά επίδραση στις συνολικές εκπομπές GHG που σχετίζονται με την παραγωγή βιομεθανόλης. Οι εκπομπές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλουν εγγενώς ανάλογα με την ακατέργαστη πηγή ενέργειας και η έκταση της εξάρτησης από ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από τη μια χώρα στην άλλη.

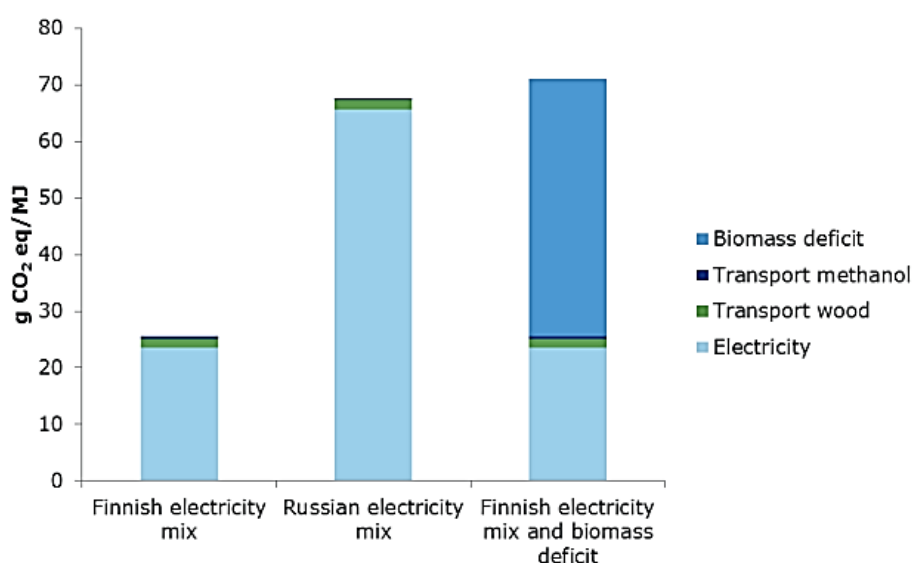
Η Εικόνα 17 παρουσιάζει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με τα μείγματα ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες χώρες, διευκρινίζοντας τον κρίσιμο ρόλο της πηγής ηλεκτρικής ενέργειας στη διαμόρφωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής βιομεθανόλης. Η διαφοροποιημένη αλληλεπίδραση μεταξύ της παραγωγής μεθανόλης, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της μεταβλητότητας των πηγών ενέργειας απαιτεί μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση για να εξακριβωθεί το γνήσιο οικολογικό αποτύπωμα της βιομεθανόλης ως θαλάσσιου καυσίμου.



Εικόνα 18: Εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικά κράτη (IMO, 2016)

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου του κύκλου ζωής (GHG) που σχετίζονται με την παραγωγή βιομεθανόλης μοντελοποιούνται συστηματικά στη μελέτη DNV GL, «The Fuel Trilemma»

(Chryssakis, et al., 2015). Η μελέτη βασίζεται στους υπολογισμούς της σε ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας 2,1 MWh ανά τόνο μεθανόλης. Οι εκπομπές GHG από τα μείγματα ηλεκτρικής ενέργειας προέρχονται από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA). Για να ληφθούν υπόψη σενάρια όπου μια μονάδα αντιμετωπίζει έλλειμμα βιομάζας, με αποτέλεσμα την ανάγκη συμπλήρωσης με εναλλακτικά καύσιμα, μια πρόσθετη ζήτηση βιομάζας 15% θεωρείται ότι ικανοποιείται με την καύση υπολειμματικού μαζούτ. Τα αποτελέσματα αυτής της άσκησης μοντελοποίησης, χρησιμοποιώντας τα ενεργειακά μείγματα της Φινλανδίας και της Ρωσίας, απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα 18.



Εικόνα 19: Well to tank εκπομπές GHG μεθανόλης που παράγεται από βιομάζα (IMO, 2016)

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι άμεσες εκπομπές GHG που προκύπτουν από την καύση αερίου σύνθεσης που προέρχεται από βιομάζα και την επακόλουθη καύση της μεθανόλης που λαμβάνεται από βιομεθανόλη θεωρούνται κλιματικά ουδέτερες. Κατά συνέπεια, αυτές οι άμεσες εκπομπές εξαιρούνται από τον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών του κύκλου ζωής. Αυτός ο αποκλεισμός βασίζεται στην υπόθεση ότι ο άνθρακας που απελευθερώνεται κατά την καύση προέρχεται από ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> που αφομοιώθηκε πρόσφατα από τη βιομάζα κατά τη φάση ανάπτυξής της. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τη διαδικασία καύσης έναν βρόχο ουδέτερο ως προς τον άνθρακα, βασικό στοιχείο για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της βιομεθανόλης.

Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 18 προδίδουν τη διαφοροποιημένη αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών ενεργειακών μειγμάτων και των πιθανών ελλειμμάτων στην παροχή βιομάζας. Η σύγκριση μεταξύ της Εικόνας 17 και της Εικόνας 18

υπογραμμίζει ότι, ενώ οι εκπομπές παραγωγής βιομεθανόλης με βιομάζα παρουσιάζουν οριακές μειώσεις σε σύγκριση με το φυσικό αέριο, η επακόλουθη καύση βιομεθανόλης και μεθανόλης που προέρχεται από φυσικό αέριο έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά λιγότερες εκπομπές GHG.

#### 2.2.4 Καύση μεθανόλης σε πλοία: Ανάλυση εκπομπών και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Για την αποσαφήνιση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που προκύπτουν από την καύση μεθανόλης στα πλοία, μια βασική παράμετρος είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα ανά MJ καυσίμου. Παρόλο που η περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις που εξαρτώνται από την καθαρότητα της πρώτης ύλης, η διαδικασία παραγωγής διασφαλίζει την καθαρότητα του τελικού προϊόντος. Σε αυτή την εργασία ακολουθείται η υπόθεση ότι η καύση μεθανόλης αποδίδει 69 γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά MJ μεθανόλης που καίγεται. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που προέρχονται από την καύση βιομεθανόλης θεωρούνται κλιματικά ουδέτερες, σύμφωνα με την υπόθεση ότι το CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται από καύσιμο με βάση τη βιομάζα αντισταθμίζεται από την απορρόφηση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> κατά την ανάπτυξη νέας βιομάζας, αντικαθιστώντας ουσιαστικά τη βιομάζα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή καυσίμων (IMO, 2016).

Μελέτες επιβεβαιώνουν την αμελητέα επίδραση των εκπομπών μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και υποξειδίου του αζώτου (N<sub>2</sub>O) από την καύση μεθανόλης. Επιπλέον, οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>) εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε θείο της μεθανόλης, η οποία θεωρείται αμελητέα σε αυτό το πλαίσιο. Η συνολική περιβαλλοντική αξιολόγηση μειώνει επομένως αυτές τις εκπομπές στη συνολική λογιστική των αερίων θερμοκηπίου (GHG), δεδομένης της ελάχιστης συνεισφοράς τους (IMO, 2016).

Η αξιολόγηση των μελετών επεκτείνεται στις εκπομπές οξειδίου του αζώτου (NO<sub>x</sub>), μια πτυχή που απαιτεί ενδελεχή διερεύνηση λόγω περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων. Η Wärtsilä πραγματοποίησε δοκιμές σε δύο μοντέλα κινητήρων, τον Wärtsilä Vasa 32 και τον Sulzer Z40S-MD, συγκρίνοντας τις εκπομπές NO<sub>x</sub> από την καύση μεθανόλης και βαρέος μαζούτ (HFO). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι εκπομπές NO<sub>x</sub> από τη μεθανόλη ήταν περίπου το 40% εκείνων από HFO υπό παρόμοιες συνθήκες φορτίου. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι εκπομπές NO<sub>x</sub> δεν έφτασαν τα επίπεδα Βαθμίδας III, με αποτέλεσμα να υποτεθεί ότι οι εκπομπές NO<sub>x</sub> κατά την καύση μεθανόλης παρουσιάζουν μείωση κατά 60% περίπου σε σύγκριση με το HFO. Παράλληλα, οι δοκιμές που διεξήγαγε η MAN Diesel σε κινητήρες ντίζελ θαλάσσης έδειξαν μείωση 30% στις εκπομπές NO<sub>x</sub> κατά τη χρήση μεθανόλης σε σύγκριση με το παραδοσιακό ντίζελ (Sustainable Ships, 2023).

Για να ενισχυθεί αυτή η ανάλυση, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καθιέρωση μιας πιο ολοκληρωμένης κατανόησης των εκπομπών NOx από την καύση μεθανόλης, που περιλαμβάνει διάφορα μοντέλα κινητήρων και συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, λαμβανομένου υπόψη του εξελισσόμενου ρυθμιστικού τοπίου, είναι επιτακτικές οι συνεχείς προσπάθειες για την ευθυγράμμιση της καύσης μεθανόλης με αυστηρά πρότυπα εκπομπών, όπως το Tier III.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν από τους Wärtsilä και MAN παρουσιάζουν ανόμοια αποτελέσματα. Ωστόσο, και οι δύο επιβεβαιώνουν μια σημαντική μείωση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου (NOx) όταν χρησιμοποιείται μεθανόλη. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε ότι οι εκπομπές NOx συνδέονται περίπλοκα με τις συνθήκες καύσης, εισάγοντας ένα στοιχείο αβεβαιότητας σε οποιαδήποτε παράμετρο που υποδεικνύει εκπομπές NOx ανά megajoule (MJ) καυσίμου. Αυτή η εγγενής μεταβλητότητα υπογραμμίζει την ανάγκη για μια διαφοροποιημένη αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν τις εκπομπές NOx.

Εκτός από τη μείωση των NOx, οι δοκιμές Wärtsilä αποκαλύπτουν ότι η απόδοση καυσίμου παραμένει σταθερή ή ακόμη και βελτιώνεται όταν λειτουργεί με μεθανόλη. Ενώ η επιχειρησιακή εμπειρία της Stena συνεπάγεται βελτίωση της απόδοσης καυσίμου κατά 1-2% με μεθανόλη, είναι αξιοσημείωτο ότι επίσημες δοκιμές που τεκμηριώνουν αυτήν την αλλαγή δεν έχουν διεξαχθεί. Κατά συνέπεια, θεωρείται ότι η ενεργειακή απόδοση των κινητήρων θαλάσσης παραμένει αναλλοίωτη κατά την καύση μεθανόλης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί μια οριακή αύξηση στην κατανάλωση λαδιού λίπανσης κατά την καύση μεθανόλης. Ωστόσο, αυτό κρίνεται αμελητέο στο συνολικό επιχειρησιακό πλαίσιο.

Οι συντελεστές καύσης που χρησιμοποιούνται για τη μεθανόλη περιλαμβάνουν διάφορες παραμέτρους, όλες εκ των οποίων εμφανίζουν έναν ορισμένο βαθμό εξάρτησης από τον τύπο του κινητήρα. Αυτοί οι παράγοντες αποτελούν βασικά στοιχεία για την πλήρη κατανόηση της δυναμικής καύσης της μεθανόλης σε διάφορους κινητήρες ναυτιλίας, και η περαιτέρω έρευνα είναι επιτακτική για τη βελτίωση και την επέκταση αυτών των παραγόντων.

Για να προωθηθεί αυτή η έρευνα, μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να εμβαθύνουν στις ποσότητες των εκπομπών NOx υπό διαφορετικές συνθήκες καύσης, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των διαφορετικών τύπων κινητήρων. Επιπλέον, είναι απαραίτητη μια συστηματική ανάλυση της απόδοσης καυσίμου με ελεγχόμενες δοκιμές για την επικύρωση και την ποσοτικοποίηση των παρατηρούμενων βελτιώσεων που αναφέρθηκαν από χειριστές όπως το Stena. Τέτοιες έρευνες θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη πιθανές διακυμάνσεις στους

τύπους κινητήρων και στις λειτουργικές παραμέτρους, διασφαλίζοντας μια ισχυρή και καθολικά εφαρμόσιμη κατανόηση της επίδρασης της μεθανόλης στην απόδοση των κινητήρων πλοίων.

Συμπερασματικά, ενώ η μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> και η πιθανή βελτίωση στην απόδοση καυσίμου παρουσιάζουν πολλές υποσχόμενες πτυχές της καύσης μεθανόλης, οι εγγενείς πολυπλοκότητες απαιτούν μια πιο εξαντλητική και τυποποιημένη ερευνητική προσέγγιση. Αυστηρά πρωτόκολλα δοκιμών, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς κινητήρες και συνθήκες λειτουργίας, θα συμβάλουν στην πλήρη κατανόηση των επιπτώσεων και της σκοπιμότητας της μεθανόλης ως βιώσιμο καύσιμο πλοίων.

Compound	Emissions (g/MJ methanol)
CO <sub>2</sub>	69
CH <sub>4</sub>	0
N <sub>2</sub> O	0
NO <sub>x</sub>	0.4
SO <sub>x</sub>	0

Εικόνα 20: Εκπομπές μεθανόλης κατά τη καύση σε μηχανές πλοίων (Sustainable Ships, 2023)

Ενώ η καύση μεθανόλης παρουσιάζει αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα όσον αφορά τις μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub> και την απουσία ορισμένων ρύπων, ιδίως εκπομπών που σχετίζονται με το θείο, η συνεχής έρευνα και η συνεργασία της βιομηχανίας είναι ουσιαστικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της περιβαλλοντικής της απόδοσης. Η σύνθεση δεδομένων από διάφορες δοκιμές κινητήρων και η τήρηση των εξελισσόμενων προτύπων εκπομπών θα συμβάλει σε μια πιο εύρωστη και διαφοροποιημένη αξιολόγηση της μεθανόλης ως βιώσιμου και περιβαλλοντικά υπεύθυνου ναυτιλιακού καυσίμου.

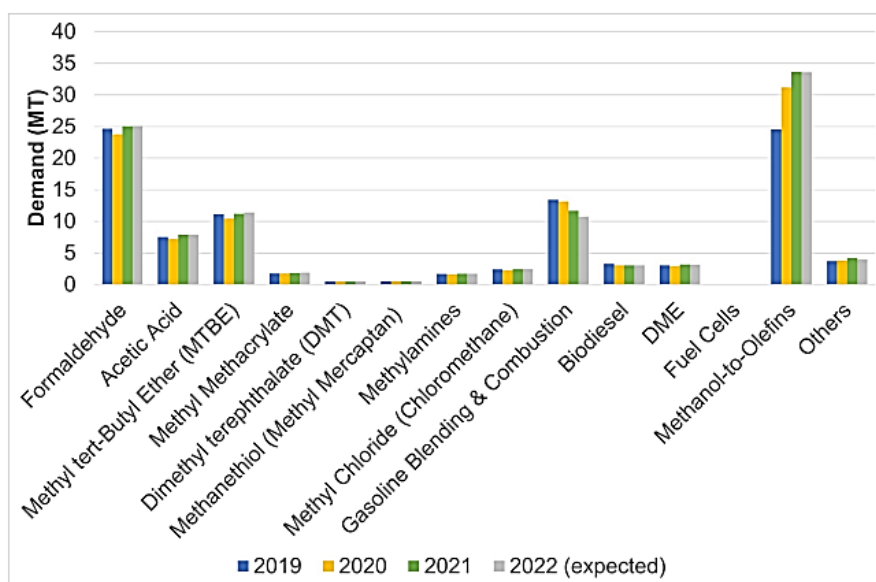


### 2.2.5 Διαθεσιμότητα μεθανόλης

Σύμφωνα με το DNV (2022a), τα υπό λειτουργία εργοστάσια μεθανόλης παγκοσμίως ξεπερνούν τα 90, κατανεμημένα σε ηπείρους όπως η Αφρική, η Ασία, η Ευρώπη, η Μέση Ανατολή, η Βόρεια Αμερική και η Νότια Αμερική. Αυτές οι εγκαταστάσεις συμβάλλουν συλλογικά σε μια παγκόσμια δυναμικότητα περίπου 110 εκατομμυρίων τόνων (Mt). Συγκεκριμένα, η Κίνα είναι ο μεγαλύτερος παγκόσμιος παραγωγός, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το ήμισυ της συνολικής παραγωγής (Kajaste, et al., 2018). Ωστόσο, είναι επιτακτική ανάγκη να αναγνωρίσουμε ότι η εξάρτηση της Κίνας από τον άνθρακα στη διαδικασία παραγωγής μεθανόλης οδηγεί σε υψηλή ένταση εκπομπών, που υπολογίζεται στα 300 g CO<sub>2</sub> eq/MJ, σε αντίθεση με άλλες χώρες.

Η ευρωπαϊκή ικανότητα παραγωγής μεθανόλης, που εκτιμάται από την Argus Methanol (2022), είναι περίπου 10 Mt το 2022. Εντός της ΕΕ-27 και της Νορβηγίας, αυτή η δυναμικότητα αντιπροσωπεύει περίπου το 35%, περιλαμβάνοντας μονάδες που λειτουργούν από τις BASF, Shell/DEA, Mider, BP RP (Γερμανία) και OCI (Ολλανδία) και Equinor (Νορβηγία). Στη Βόρεια και Νότια Αμερική, η εκτιμώμενη παραγωγική ικανότητα για το 2022 είναι περίπου 23 Mt, ενώ στη Μέση Ανατολή και την Αφρική, είναι 33 Mt (Argus, 2022).

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται η παγκόσμια ζήτηση μεθανόλης τα τελευταία χρόνια, ως προς τη χρήση της σε βασικές παραγωγικές διεργασίες.

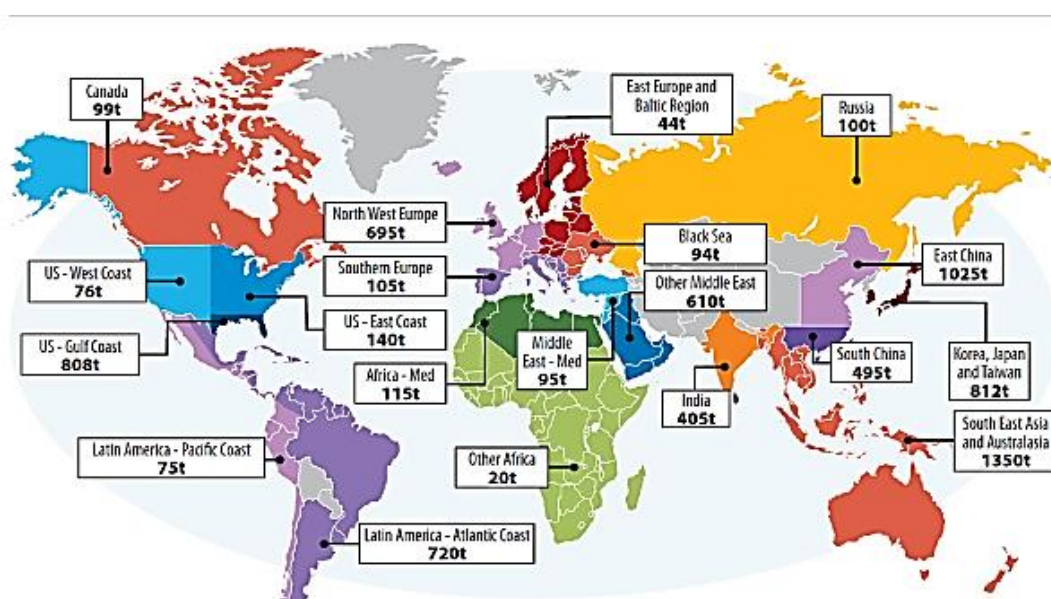


Εικόνα 21: Παγκόσμια ζήτηση μεθανόλης για τα έτη 2019 έως 2022 (Argus, 2022)

Η Εικόνα 21 δείχνει μια σημαντική αύξηση της ζήτησης μεθανόλης, ιδιαίτερα στην παραγωγή ολεφινών (ΜΤΟ). Αυτή η αύξηση οφείλεται κυρίως στην Κίνα, με στόχο να υποκαταστήσει τη

νάφθα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ολεφινών, που χρησιμοποιείται στη δημιουργία χημικών και πολυμερών προϊόντων όπως πλαστικά, καουτσούκ και συσκευασίες τροφίμων. Το 2022, οι όγκοι παραγωγής μεθανόλης μέσω εναλλακτικών οδών, όπως η βιομεθανόλη από υπολειμματική βιομάζα ή η e-μεθανόλη, ήταν περιορισμένοι. Η μελλοντική διαθεσιμότητα αυτών των εναλλακτικών λύσεων εξαρτάται από επενδύσεις για την επέκταση της παραγωγικής ικανότητας. Η DNV (2022a) προβλέπει ότι αξιοσημείωτοι όγκοι βιο- και e-μεθανόλης θα εισέλθουν στην αγορά γύρω στο 2024 ή το 2025. Για παράδειγμα, η ναυτιλιακή εταιρεία Maersk έχει δημιουργήσει συνεργασίες για την παραγωγή τουλάχιστον 600000 τόνων ετησίως e-μεθανόλης και τουλάχιστον 130000 τόνους βιομεθανόλης ετησίως έως το τέλος του 2025.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ετήσια παραγωγική ικανότητα μεθανόλης χαρακτηρίζεται ισχυρή με την πλειοψηφία όμως να χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία. Παραδόξως, μόνο εννέα εκατομμύρια τόνοι διατίθενται για καύσιμα, κυρίως ως μείγμα βενζίνης. Σε σχέση με την ναυτιλία το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζει αυτή η επιλογή είναι κυρίως η μεταφορά καθώς προς το παρόν δεν υπάρχουν ολοκληρωμένα δίκτυα και η μεταφορά γίνεται κυρίως με φορτηγά.



Εικόνα 22: Εκτίμηση της δυναμικότητας αποθήκευσης μεθανόλης

### 2.2.6 Υποδομές εφαρμογής Μεθανόλης σε Ναυτιλιακά καύσιμα

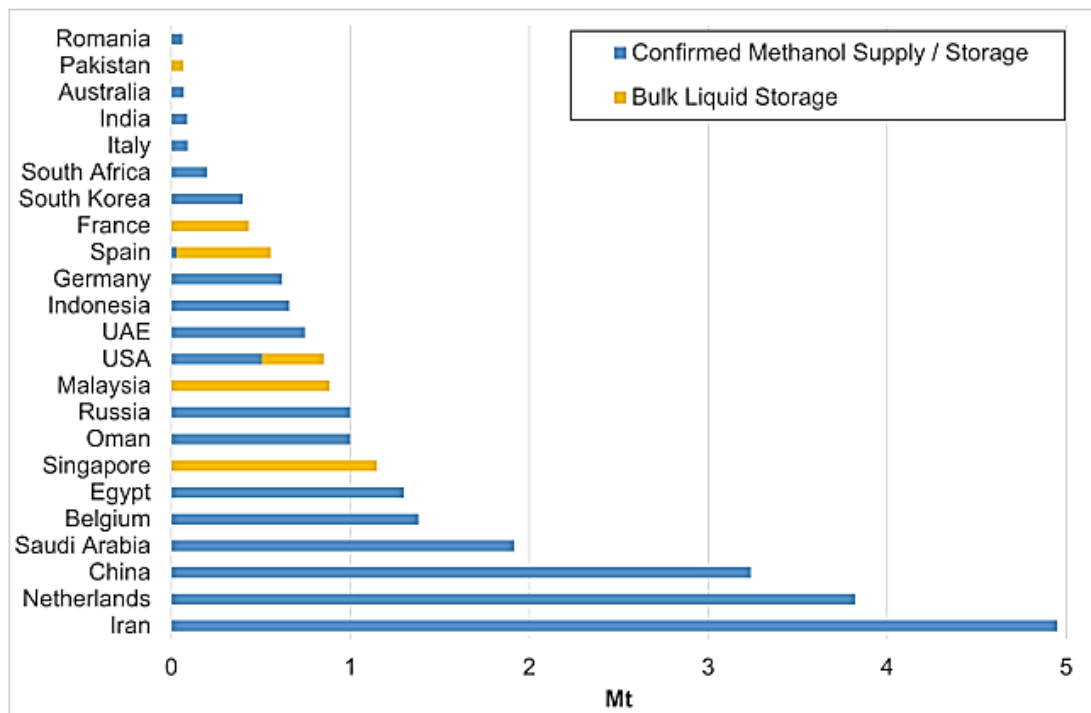
Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) ανέφερε συνολική κατανάλωση 203 εκατομμυρίων τόνων μαζούτ το 2020 για πλοία 5.000 GT και άνω, που ρυθμίζεται βάσει του κανονισμού 22A του Παραρτήματος VI της MARPOL. Το βαρύ μαζούτ (HFO) και το ελαφρύ

μαζούτ (LFO) αποτελούσαν το 50% και το 32% της συνολικής κατανάλωσης, αντίστοιχα. Το ντίζελ (MDO) και το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης πλοίων (MGO) συνεισέφεραν 13%, ενώ η μεθανόλη, ως καύσιμο πλοίων, είχε σημαντικά μικρότερο ρόλο, αντιπροσωπεύοντας 77.631 τόνους, που αντιστοιχεί στο 0,04% του συνόλου του μαζούτ που καταναλώθηκε το 2020 (IMO-International Maritime Organization, 2021). Η υπάρχουσα χωρητικότητα αποθήκευσης και η υποδομή έχουν σχεδιαστεί κυρίως για χημικές και ενεργειακές εφαρμογές, απαιτώντας πρόσθετα τερματικά για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης για μεθανόλη ως καύσιμο πλοίων (Fastwater, 2021).

Αν και η εμπειρία παροχής μεθανόλης ως καυσίμου πλοίων είναι περιορισμένη, αναμένεται ότι οι πρακτικές ανεφοδιασμού θα ευθυγραμμιστούν με τα καθιερωμένα καύσιμα πλοίων (Fastwater, 2021). Ο ανεφοδιασμός, αναφερόμενος στην προμήθεια καυσίμων στα πλοία, περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους:

- Ανεφοδιασμός φορτηγών σε πλοίο: Αυτή είναι η πιο κοινή μέθοδος, αξιοποιώντας την υπάρχουσα εμπειρία οδικών μεταφορών. Χρησιμοποιείται συχνά για LNG.
- Ανεφοδιασμός από πλοίο αποθήκευσης σε πλοίο: Συχνό για μεγαλύτερα πλοία, που περιλαμβάνει μεταφορά καυσίμων μέσω πλοίων ανεφοδιασμού καυσίμων, δεξαμενόπλοιων ή φορτηγίδων.
- Δεξαμενή αποθήκευσης εδάφους ή ανεφοδιασμός από τερματικό σταθμό σε πλοίο: Χρήση σωλήνων ή εύκαμπτων σωλήνων για πλοία που εκτελούν δρομολόγια εκτός λιμένα προέλευσης ή για πλοία με σταθερές διαδρομές.

Η επιλογή ανεφοδιασμού μεθανόλης εξαρτάται από το λιμάνι και τη ζήτηση καυσίμου. Γενικά τα νέα καύσιμα μπορεί να παραδοθούν άμεσα μέσω μεθόδων από φορτηγό σε πλοίο ή από πλοίο σε πλοίο. Παρά τους κινδύνους που σχετίζονται με τις ιδιότητες της μεθανόλης, όπως η ευφλεκτότητα και η τοξικότητα, τα λιμάνια έχουν εμπειρία στον ασφαλή χειρισμό της μεθανόλης (Horton, et al., 2022). Διαθεσιμότητα υπάρχει σε περισσότερα από 100 λιμάνια παγκοσμίως (EC - European Commission, 2021). Η Εικόνα 22 περιγράφει τη δυναμικότητα αποθήκευσης του καυσίμου σε διάφορες χώρες η οποία ανέρχεται συνολικά περίπου σε 25 Mt. Το Ιράν, η Ολλανδία, η Κίνα, η Σαουδική Αραβία και το Βέλγιο συνεισφέρουν συλλογικά το 60% της παγκόσμιας χωρητικότητας αποθήκευσης της μεθανόλης σε καθορισμένα λιμάνια. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η ικανότητα εξαρτάται από τη μελλοντική ζήτηση για μεθανόλη ως καύσιμο πλοίων. Η υπάρχουσα υποδομή για τα προϊόντα πετρελαίου θα μπορούσε με μικρές τροποποιήσεις να αξιοποιηθεί για την αποθήκευση μεθανόλης (Fastwater, 2021).



Note: Bulk liquid storage refers to ports with the potential to store chemicals, such as methanol and ethanol, whereas confirmed methanol supply / storage refers only to the capacity of ports to supply methanol.

Εικόνα 23: Λιμένες με διαθέσιμη χωρητικότητα αποθήκευσης μεθανόλης το 2020

Οι προβλέψεις για το μελλοντικό μείγμα καυσίμων στη ναυτιλία ποικίλλουν, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες για τις μελλοντικές τιμές και τις διαθεσιμότητές τους. Το DNV μοντελοποιεί 24 σενάρια για το μείγμα καυσίμων του παγκόσμιου στόλου το 2050. Ορισμένα σενάρια δείχνουν σημαντικά μερίδια e-μεθανόλης, που ξεπερνούν το 60%, υποθέτοντας χαμηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, απανθρακοποίηση έως το 2050 και αυξημένη παραγωγή μεθανόλης ως στα τέλη της δεκαετίας του 2030 (DNV GL, 2021). Το MMKMC (Maersk Mc-Kinney Moller Center) αναφέρει ότι σημαντικά μερίδια e-μεθανόλης θα μπορούσαν να εμφανιστούν το 2050 εάν η αμμωνία κριθεί δυσμενής. Μαζί με τη βιομεθανόλη, η e-μεθανόλη θα μπορούσε να συνεισφέρει σχεδόν 50% στο μείγμα καυσίμων το 2050 (MMKMC - Maersk Mc-Kinney Møller Center, 2021).

Η ήδη προσδιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης 25 Mt, με πιθανή μετατροπή της υποδομής ορυκτών καυσίμων, υποδηλώνει ετοιμότητα για τη μεθανόλη ως καύσιμο πλοίων. Ωστόσο, ενδέχεται να απαιτηθούν πρόσθετες επενδύσεις υποδομής εάν η ζήτηση αυξηθεί σημαντικά. Το πλεονέκτημα της μεθανόλης έγκειται στην πιθανή χρήση της υπάρχουσας υποδομής συμβατικών καυσίμων με μικρές τροποποιήσεις σε σύγκριση με εναλλακτικά καύσιμα όπως η αμμωνία.

Προκλήσεις και ζητήματα υποδομής:

Η υπάρχουσα υποδομή για τη διανομή μεθανόλης είναι κατά κύριο λόγο προσαρμοσμένη για να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της χημικής βιομηχανίας. Αν και αυτό εξασφαλίζει ευρεία διαθεσιμότητα, υπάρχει αναγνωρισμένη ανάγκη για πρόσθετα τερματικά ειδικά σχεδιασμένα για καύσιμα πλοίων. Στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών Θείου (SECAs), υπάρχουν πολυάριθμοι τερματικοί σταθμοί για να καλύψουν τις απαιτήσεις της χημικής βιομηχανίας. Σε ορισμένα ευρωπαϊκά λιμάνια, η μεθανόλη κατατάσσεται μεταξύ των κορυφαίων χημικών προϊόντων όσον αφορά τον όγκο διακίνησης. Η διανομή από αυτούς τους κόμβους διευκολύνεται από φορτηγίδες 1.200 τόνων, σιδηροδρομικές μεταφορές ή βυτιοφόρα.

### 2.2.7 Χρήση μεθανόλης ως καυσίμου πλοίων – Υπάρχουσα κατάσταση

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η χρήση της μεθανόλης ως καυσίμου στη ναυτιλία παραμένει οριακή, αποτελώντας λιγότερο από το 2% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου, η οποία αποτελείται κυρίως από συμβατικά ορυκτά καύσιμα όπως το Heavy Fuel Oil (HFO) ή το Marine Gas Oil (MGO) (DNV, 2022). Η επιβολή ενός παγκόσμιου ανώτατου ορίου θείου στα καύσιμα και οι κλιμακούμενοι περιβαλλοντικοί κανονισμοί έχουν οδηγήσει σε μια σταδιακή στροφή από το HFO σε καθαρότερες εναλλακτικές λύσεις όπως το MGO και το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG). Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), μόλις το 0,01% των 46 εκατομμυρίων τόνων καυσίμων που καταναλώθηκαν το 2019 αποτελούνταν μεθανόλη (EC - European Commission, 2021). Τον Φεβρουάριο του 2023, αναφέρθηκε ότι μόνο 22 πλοία, κυρίως δεξαμενόπλοια, λειτουργούσαν με μεθανόλη (DNV, 2023).

Μια αξιοσημείωτη περίπτωση είναι το Stena Germanica, ένα ferryboat RoPax που εξοπλίστηκε εκ των υστέρων με κινητήρα μεθανόλης Dual-Fuel (DF) το 2015 (Stenaline, 2023). Τα πλοία που τροφοδοτούνται με μεθανόλη αποτελούν μειοψηφία μεταξύ των πλοίων που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα. Σύμφωνα με το DNV στις αρχές του 2022, παραγγέλνονταν 35 πλοία με καύσιμα μεθανόλης, που αντιπροσωπεύουν το 1,45% του παγκόσμιου στόλου. Ωστόσο, πρόσφατες ανακοινώσεις από μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες δείχνουν αύξηση στις νέες παραγγελίες πλοίων με κινητήρες που μπορούν να χρησιμοποιούν μεθανόλη, με τη Maersk να παραγγέλλει 19 πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεθανόλης DF, η COSCO να παραγγέλλει 12 πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεθανόλης DF και η CMA CGM να παραγγέλλει 6 πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεθανόλης DF (Maersk, 2023) (Ajdin, 2022) (LNG Prime Staff, 2022).

Οι Fahnstock και Bingham αναφέρουν επιπλέον 10 έργα που σχετίζονται με εφαρμογή μεθανόλης ως καυσίμου, που περιλαμβάνουν νέες κατασκευές, μετασκευές και έρευνα τεχνολογίας πλοίων, ενσωματώνοντας τη μεθανόλη στους κινητήρες εσωτερικής καύσης

(ICE) για την πρόωση. Αυτή η τάση αντανακλάται περαιτέρω από το αυξανόμενο μερίδιο των νέων κατασκευών που εμπλέκουν τη μεθανόλη από τις αρχές του 2022, καταδεικνύοντας συγκρίσιμο ποσοστό όσον αφορά τον αριθμό των πλοίων και την ολική χωρητικότητα πλοίων μεταφοράς LNG (Fahnestock, et al., 2021). Από τις αρχές του 2023, περισσότερα από 80 πλοία με μεθανόλη ήταν είτε σε λειτουργία είτε σε παραγγελία, με περίπου το 50 έως 60% των νέων παραγγελιών στον τομέα των εμπορευματοκιβωτίων να τροφοδοτούνται με καύσιμα μεθανόλης (DNV, 2023).

Όσον αφορά τις καινοτόμες τεχνολογίες, οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν μεθανόλη στον ναυτιλιακό τομέα βρίσκονται επί του παρόντος σε φάση ανάπτυξης και δοκιμής, με λίγα μόνο έργα σε εξέλιξη (EC - European Commission, 2021). Ένα αξιοσημείωτο έργο επίδειξης είναι το MS Innogy, το οποίο τροφοδοτείται από μια κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) με προηγούμενη αναμόρφωση μεθανόλης επί του πλοίου (Mfame team, 2017). Επιπλέον, τα PEMFC υψηλής θερμοκρασίας, που χρησιμοποιούν υδρογόνο από μεθανόλη, υποβάλλονται σε δοκιμές στο AIDAνονα ως μέρος ενός υβριδικού ενσωματωμένου ενεργειακού συστήματος, με το μελλοντικό κρουαζιερόπλοιο Silver Nova να σχεδιάζει να ενσωματώσει ένα υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου και μπαταριών παράλληλα με την κύρια χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) (Project Finder/Pa-X-ell2) (Meyer Werft, 2023).

### 2.2.8 Χρήση Μεθανόλης σε Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης (ICE)

Η χρήση μεθανόλης σε συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης ντίζελ (ICE), σχεδιασμένες για βαρύ μαζούτ (HFO) ή για «πετρέλαιο θαλάσσης» (MGO), απαιτεί τροποποιήσεις λόγω της αδυναμίας της να χρησιμοποιηθεί απευθείας. Ενώ μπορεί να αναμιχθεί με καύσιμα που τύπου ντίζελ, η ανάμειξη περιορίζεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, εμποδίζοντας την πλήρη μετάβαση στη μεθανόλη (Cames et al., 2023). Επί του παρόντος, οι αποκλειστικοί κινητήρες μεθανόλης, τόσο δίχρονοι όσο και τετράχρονοι, έχουν αναπτυχθεί από μεγάλους κατασκευαστές κινητήρων πλοίων, οι οποίοι συχνά διαμορφώνονται ως κινητήρες διπλού καυσίμου (DF). Αυτοί οι κινητήρες μεθανόλης παρουσιάζουν συγκρίσιμη ενεργειακή απόδοση (περίπου 45%) με άλλους υπάρχοντες κινητήρες. Ωστόσο, σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες που έχουν βελτιστοποιηθεί για HFO, οι κινητήρες μεθανόλης απαιτούν συγκεκριμένες τροποποιήσεις όπως ο σχεδιασμός ψεκασμού καυσίμου, οι κυλινδροκεφαλές και οι σωληνώσεις (Ming and Chen, 2021; Wärtsilä, 2022).

Οι κινητήρες DF επιτρέπουν τη λειτουργία με δύο διαφορετικά καύσιμα, συνήθως ένα εναλλακτικό όπως η μεθανόλη και ένα συμβατικό ορυκτό καύσιμο όπως το HFO ή το MGO.

Λόγω των κακών ιδιοτήτων αυτανάφλεξης της μεθανόλης, οι μεγάλοι κινητήρες DF χρησιμοποιούν ένα πιλοτικό καύσιμο (περίπου 5%) για να διευκολύνουν την καύση, παρόμοια με άλλα καύσιμα όπως το LNG. Αυτό το πιλοτικό καύσιμο, ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία του πλοίου με ουδέτερη κλιματική αλλαγή, πρέπει από μόνο του να είναι κλιματικά ουδέτερο καύσιμο. Για παράδειγμα, η Maersk σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει βιοντίζελ ως πιλοτικό καύσιμο για τα μελλοντικά της πλοία με καύσιμα μεθανόλης για να επιτύχει πλοία ουδέτερα από άνθρακα.

Τα μικρότερα τετράχρονα ICE σχεδιασμένα για μεθανόλη είναι ακόμα υπό ανάπτυξη και αναμένονται τα επόμενα χρόνια (DNV, 2022c). Σε περιπτώσεις όπου η μεθανόλη δεν χρησιμοποιείται σε κινητήρες DF, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανάμειξη με μικρές ποσότητες ουσιών για τη διευκόλυνση της καύσης. Σε σύγκριση με το υδρογόνο ή την αμμωνία, η τεχνολογία καύσης της μεθανόλης είναι συνολικά πιο ώριμη (ibid, Cames et al., 2021).

Σύμφωνα με τους Smith et al. (2021), σχεδόν ο μισός παγκόσμιος στόλος το 2050 θα αποτελείται από πλοία που έχουν μετασκευαστεί για να λειτουργούν με εναλλακτικά, κλιματικά ουδέτερα καύσιμα, όπως η e-μεθανόλη. Εκτός από τις νέες κατασκευές, η δυνατότητα μετασκευής υφιστάμενων πλοίων με κινητήρες μεθανόλης είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων μείωσης των εκπομπών έως το 2050. Οι μετασκευές περιλαμβάνουν μικρές τροποποιήσεις στο πλοίο, με κιτ μετασκευής ή λύσεις πλήρους μετατροπής που προσφέρονται από κατασκευαστές κινητήρων. Αυτά τα κιτ περιλαμβάνουν όχι μόνο τη μετασκευή του κινητήρα αλλά και άλλες απαραίτητες αλλαγές, συμπεριλαμβανομένου ενός νέου συστήματος παροχής καυσίμου που περιλαμβάνει μια μονάδα αντλίας καυσίμου μεθανόλης και μια σειρά βαλβίδων καυσίμου μεθανόλης (Wärtsilä, 2022).

Θεωρητικά, κάθε πλοίο μπορεί να εξοπλιστεί εκ των υστέρων για να λειτουργεί με μεθανόλη και υπάρχουν διαθέσιμα κιτ για διάφορα εναλλακτικά καύσιμα. Ωστόσο, η απόφαση μετατροπής ή μετασκευής ενός σκάφους εξαρτάται από εκτιμήσεις κόστους-οφέλους. Μηχανικά ελεγχόμενοι κινητήρες, συνήθως 15 έως 20 ετών, ενδέχεται να μην είναι οικονομικά βιώσιμοι για μετασκευή λόγω της υπολειμματικής αξίας του πλοίου σε σύγκριση με το εκτεταμένο κόστος μετασκευής (MAN, 2022). Η έκταση μιας πλήρους μετατροπής μπορεί να ποικίλλει, με ορισμένες πτυχές της μετασκευής να είναι διαφορετικές για το DF LNG σε μεθανόλη έναντι μιας μετατροπής μονοκαυσίμου σε μεθανόλη. Οι μετασκευές αναμένεται να διαδραματίσουν κεντρικό ρόλο στη μετάβαση του ναυτιλιακού τομέα έως το 2050, ιδίως λαμβάνοντας υπόψη το αυξανόμενο ποσοστό νέων κατασκευών που μπορούν



να λειτουργούν με εναλλακτικά καύσιμα (συμπεριλαμβανομένου του LNG). Ωστόσο, η έκταση των προγραμμάτων μετασκευής είναι δύσκολο να προβλεφθεί, καθώς οι μεμονωμένες αποφάσεις για κάθε πλοίο επηρεάζονται από παράγοντες όπως η ανάλυση κόστους-οφέλους, ο κίνδυνος εσφαλμένων επενδυτικών αποφάσεων και η αβεβαιότητα σχετικά με τους μελλοντικούς κανονισμούς και τις επιλογές καυσίμων (DNV, 2022c, Fricaudet et al. , 2022). Η έγκαιρη διευκρίνιση της πολιτικής θεωρείται κρίσιμη για την αποφυγή εσφαλμένων επενδυτικών αποφάσεων στη ναυτιλιακή βιομηχανία (Fricaudet et al., 2022).

### 2.2.9 Χρήση Μεθανόλης σε Κυψέλες Καυσίμου

Η μεθανόλη χρησιμεύει ως βιώσιμη επιλογή στις κυψέλες καυσίμου, είτε άμεσα είτε ως φορέας υδρογόνου. Στην τελευταία περίπτωση, η μεθανόλη υφίσταται αναμόρφωση ή πυρόλυση για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτηθεί σε διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) ή κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC). Το PEMFC και το SOFC παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE), επιτυγχάνοντας 50-60% και 60%, αντίστοιχα (Tronstad et al., 2017). Οι αναμενόμενες μελλοντικές εξελίξεις ενδέχεται να βελτιώσουν περαιτέρω την απόδοση των κυψελών καυσίμου και η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας θα μπορούσε να συμβάλει στην αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Για παράδειγμα, η απόδοση του SOFC μπορεί να φτάσει έως και το 85% (Tronstad et al., 2017).

Οι κυψέλες καυσίμου απευθείας μεθανόλης (DMFC) εξαλείφουν την ανάγκη για το βήμα αναμόρφωσης, αλλά βρίσκονται ακόμη σε αναπτυξιακά στάδια, με χαμηλότερη απόδοση περίπου 20% σύμφωνα με τους Tronstad et al. (2017). Η μετάβαση από το ICE στις κυψέλες καυσίμου απαιτεί ένα επανασχεδιασμένο πλοίο, που θα ενσωματώνει έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Αν και πολλά πλοία χρησιμοποιούν σήμερα ένα ντίζελ-ηλεκτρικό σύστημα, τα συστήματα κυψελών καυσίμου αντιμετωπίζουν σήμερα χωρικούς περιορισμούς παρά την υψηλότερη απόδοσή τους. Επιπλέον, η ενσωματωμένη αναμόρφωση της μεθανόλης σε υδρογόνο απαιτεί πρόσθετη ενέργεια, αυξάνοντας τις συνολικές απαιτήσεις για αυτήν την οδό καυσίμου, εκτός εάν προκύψει σημαντική ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας. Οι κυψέλες καυσίμου μπορεί να βρουν μεγαλύτερη καταλληλότητα σε τετράχρονες εφαρμογές, όπως μικρότερα πλοία ή κρουαζιερόπλοια, σε σύγκριση με την αντικατάσταση μεγάλων δίχρονων κινητήρων σε εκτεταμένα ταξίδια λόγω της περιορισμένης ισχύος εξόδου τους.



Παρόλα αυτά, μια μελέτη των Mao et al. (2020) προτείνει τη δυνατότητα των κυψελών καυσίμου για την τροφοδοσία μεγάλων δίχρονων κινητήρων των πλοίων βαθέων υδάτων. Οι συγγραφείς απέδειξαν τη σκοπιμότητα της λειτουργίας σημαντικών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ των ΗΠΑ και της Κίνας αποκλειστικά με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, αν και με την αποδοχή της ελάχιστης απώλειας φορτίου και τις λειτουργικές προσαρμογές. Η μετασκευή πλοίων με κυψέλες καυσίμου, ενώ είναι δυνατή, θέτει προκλήσεις λόγω του υψηλού κόστους κεφαλαίου και των σημαντικών διαφορών στο σύστημα καυσίμων, όπως οι κροτίδες, που απαιτούν σημαντική προσπάθεια για μετατροπή από μηχανικό κινητήρα ντίζελ (DNV GL, 2019; Cames et al. , 2023). Επί του παρόντος, οι κυψέλες καυσίμου έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τους κινητήρες πλοίων, περίπου 15 χρόνια σε αντίθεση με τη διάρκεια ζωής των 30 ετών ενός ICE (Horton et al., 2022; Korberg et al., 2021).

Υπό το πρίσμα αυτών των τεχνικών περιορισμών, οι κυψέλες καυσίμου οραματίζονται ως μια μακροπρόθεσμη λύση, η οποία προσφέρει ουσιαστικά οφέλη για τύπους πλοίων που χρησιμοποιούν ήδη ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα υβριδικά συστήματα θεωρούνται εύλογο σημείο εισόδου για τις κυψέλες καυσίμου στην αγορά, με τις αρχικές δοκιμές να βρίσκονται ήδη σε εξέλιξη. Η σταδιακή ένταξη των κυψελών καυσίμου καλείται να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις και να προσφέρει βιώσιμες λύσεις στον ναυτιλιακό τομέα.

## 2.3 Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου

Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων παραγωγής υδρογόνου είναι μια κρίσιμη πτυχή για την κατανόηση των περιβαλλοντικών του επιπτώσεων. Αυτές οι μέθοδοι συχνά διακρίνονται από χρωματικούς κώδικες, που αντικατοπτρίζουν τη φύση και το κλιματικό αποτύπωμα των διαδικασιών που εμπλέκονται.

- **Πράσινο Υδρογόνο:** Παράγεται μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από πηγές που δεν εκπέμπουν άνθρακα, όπως ο άνεμος, η ηλιακή ή η υδροηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η μέθοδος θεωρείται η πιο φιλική προς το περιβάλλον καθώς έχει ως αποτέλεσμα μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά την παραγωγή. Η αποτελεσματικότητα αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από τις εξελίξεις στην τεχνολογία της ηλεκτρόλυσης και τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Hoecke, et al., 2021).
- **Μπλε Υδρογόνο:** Παράγεται κυρίως από υδρογονάνθρακες μέσω διεργασιών όπως η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό ή η αυτοθερμική αναμόρφωση. Το καθοριστικό χαρακτηριστικό του μπλε υδρογόνου είναι η ενσωμάτωση των τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS). Αυτές οι τεχνολογίες συλλέγουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται κατά την παραγωγή υδρογόνου, εμποδίζοντας τις να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα. Ενώ το μπλε υδρογόνο μειώνει τις εκπομπές GHG σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, δεν είναι εντελώς ουδέτερο ως προς τον άνθρακα λόγω του αποτυπώματος άνθρακα των υδρογονανθράκων που χρησιμοποιούνται και των πιθανών αναποτελεσματικών τεχνολογιών CCS (Goncalves et al., 2021).
- **Γκρι υδρογόνο:** Παρόμοιο με το μπλε υδρογόνο, το γκρι υδρογόνο παράγεται από υδρογονάνθρακες. Ωστόσο, στερείται από τη διεργασία CCS, με αποτέλεσμα να προκύπτουν σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει επίσης την παραγωγή υδρογόνου με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές ενέργειας που εκπέμπουν CO<sub>2</sub>, όπως μονάδες άνθρακα ή φυσικού αερίου, χωρίς μέτρα για τη μείωση των εκπομπών GHG. Το γκρίζο υδρογόνο κυριαρχεί επί του παρόντος στην αγορά λόγω του χαμηλότερου κόστους του, αλλά δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές ανησυχίες (Goncalves et al., 2021).
- **Τυρκουάζ Υδρογόνο:** Αυτή η παραλλαγή περιλαμβάνει τη θερμική αποσύνθεση υδρογονανθράκων σε αέριο υδρογόνο και στερεό άνθρακα, συνήθως με τη μορφή αιθάλης. Αυτή η διαδικασία, γνωστή ως πυρόλυση, δεν παράγει CO<sub>2</sub> ως υποπροϊόν, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για CCS. Ωστόσο, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του

τυρκουάζ υδρογόνου εξαρτάται από την πηγή θερμικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την πυρόλυση και την αξιολόγηση του κύκλου ζωής της αιθάλης που παράγεται (Goncalves et al., 2021).

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου έχει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της. Το πράσινο υδρογόνο ευθυγραμμίζεται περισσότερο με τους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας, αλλά η ευρεία υιοθέτησή του εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ηλεκτρόλυσης. Το μπλε και το τυρκουάζ υδρογόνο προσφέρουν μεταβατικές λύσεις, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της σημερινής κυριαρχίας του γκρι υδρογόνου και μίας βιώσιμη μετάβασης στις νέες τεχνολογίες. Η ανάπτυξη και η κλιμάκωση αυτών των τεχνολογιών είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν τεθεί από διάφορους διεθνείς φορείς, συμπεριλαμβανομένης της Συμφωνίας του Παρισιού και των στόχων μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού.

### 2.3.1 Παραγωγή υδρογόνου – Υπάρχουσα κατάσταση

Από το 2021, το παγκόσμιο τοπίο της παραγωγής υδρογόνου βασιζόταν κατά κύριο λόγο στα ορυκτά καύσιμα, με συνολική παραγωγή 94 εκατομμυρίων τόνων υδρογόνου, που αντιστοιχεί σε πάνω από 900 Mt εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η κυρίαρχη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου ήταν μέσω φυσικού αερίου, χωρίς δέσμευση, χρήση και αποθήκευση άνθρακα (CCS), που αντιπροσωπεύει το 62% της συνολικής παραγωγής. Αυτή η μέθοδος, αν και αποτελεσματική, συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου λόγω της απελευθέρωσης CO<sub>2</sub> κατά τη διαδικασία αναμόρφωσης.

Εκτός από το φυσικό αέριο, το υδρογόνο παράγεται επίσης ως υποπροϊόν της αναμόρφωσης της νάφθας στα διυλιστήρια, αντιπροσωπεύοντας το 18% της συνολικής παραγωγής. Αυτό το υδρογόνο συνήθως χρησιμοποιείται εντός του διυλιστηρίου για διεργασίες όπως η υδροπυρόλυση και η αποθείωση, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότητα των εργασιών του διυλιστηρίου.

Η παραγωγή υδρογόνου από άνθρακα ήταν ένας άλλος αξιοσημείωτος παράγοντας, που αντιπροσώπευε το 19% του παγκόσμιου συνόλου, με την Κίνα να είναι ο κύριος παραγωγός. Αυτή η μέθοδος, γνωστή ως αεριοποίηση άνθρακα, περιλαμβάνει τη μετατροπή του άνθρακα σε αέριο σύνθεσης (σύνθεση), το οποίο στη συνέχεια υποβάλλεται σε επεξεργασία για την εξαγωγή υδρογόνου. Ωστόσο, παρόμοια με την αναμόρφωση του φυσικού αερίου, αυτή η διαδικασία συνδέεται με υψηλές εκπομπές CO<sub>2</sub>.

Η παραγωγή υδρογόνου από το πετρέλαιο ήταν ελάχιστη, αποτελώντας λιγότερο από το 1% της συνολικής παραγωγής. Αυτή η μέθοδος είναι λιγότερο συνηθισμένη λόγω του υψηλότερου κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου με βάση το πετρέλαιο.

Όσον αφορά την παραγωγή υδρογόνου χαμηλών εκπομπών, ήταν λιγότερο από 1 Mt (0,7%) το 2021, με την πλειοψηφία να προέρχεται από ορυκτά καύσιμα με CCUS. Αυτή η τεχνολογία συλλέγει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> που παράγονται κατά την παραγωγή υδρογόνου, μειώνοντας έτσι το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα και η επεκτασιμότητα της τεχνολογίας CCUS εξακολουθούν να αποτελούν θέματα συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης.

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού, μια διαδικασία που διασπά το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν σχετικά μικρή, αλλά παρουσίασε σημαντική αύξηση το 2021 σχεδόν 20% σε σύγκριση με το 2020. Αυτή η αύξηση δείχνει αυξανόμενο ενδιαφέρον και ανάπτυξη ηλεκτρολυτών νερού, ειδικά σε περιοχές με πρόσβαση σε ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της ηλεκτρόλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται, όταν τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προσφέρει μια πορεία προς την παραγωγή υδρογόνου με μηδενικές εκπομπές.

### 2.3.2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) από την παραγωγή υδρογόνου

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) από την παραγωγή υδρογόνου είναι απαραίτητος για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος και την αξιολόγηση του ρόλου του στις στρατηγικές μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Η Εικόνα 23 παρουσιάζει πίνακα που περιγράφει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου Well-to-Tank (WTT) για διάφορες οδούς παραγωγής υδρογόνου, με τις εκπομπές να εκφράζονται σε γραμμάρια ισοδυνάμου CO<sub>2</sub> ανά megajoule καυσίμου (g CO<sub>2</sub> eq/MJ), καλύπτοντας όλο το φάσμα της παραγωγικής διαδικασίας συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης, της επεξεργασίας, της μεταφοράς και της διανομής.

<b>Thermal gasification path</b>	<b>WTT (gCO<sub>2</sub> eq/MJ fuel)</b>
NG 4,000 km, on-site reforming <sup>32</sup>	113
Biogas from wet manure via onsite SMR	-142.4
Biogas from sewage sludge	41.6
Farmed wood, liquid transport, cryo-compression	17.8

Εικόνα 24: Εκπομπές GHG (CO<sub>2</sub> eq) για διαφορετικές μεθόδους παραγωγής συμπιεσμένου υδρογόνου (Prussi, et al., 2020)

Το φυσικό αέριο, με αγωγούς διανομής μήκους 4.000 km, έχει ως αποτέλεσμα 113 g CO<sub>2</sub> eq/MJ καυσίμου όταν αναμορφώνεται επιτόπου, καθιστώντας το σημαντικό παράγοντα στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αν και επί του παρόντος είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου λόγω της τεχνολογικής ωριμότητας και εγκατεστημένων υποδομών.

Αντίθετα, το υδρογόνο που παράγεται από την επιτόπια αναμόρφωση ατμών μεθανίου (SMR) που προέρχονται από βιοαέριο υγρής κοπριάς παρουσιάζει αρνητικές εκπομπές, - 142,4 g CO<sub>2</sub> eq/MJ, υποδηλώνοντας καθαρή απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα. Αυτή η αρνητική τιμή μπορεί να αποδοθεί στη χρήση οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαερίου, η οποία δεσμεύει το μεθάνιο - ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου - που διαφορετικά θα απελευθερωνόταν στην ατμόσφαιρα.

Η παραγωγή υδρογόνου από την ιλύ λυμάτων έχει ως αποτέλεσμα 41,6 gCO<sub>2</sub> eq/MJ καυσίμου. Αυτό η διεργασία είναι ενδεικτική της κυκλικής οικονομίας, μετατρέποντας τα απόβλητα σε ενέργεια ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις εκπομπές. Επιπλέον, το υδρογόνο που προέρχεται από ξυλεία, παρουσιάζει χαμηλότερο προφίλ εκπομπών στα 17,8 gCO<sub>2</sub> eq/MJ καυσίμου, υπογραμμίζοντας τη δυνατότητα για βιώσιμη βιομάζα ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου με χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου μπορεί να ποικίλλουν ευρέως ανάλογα με την πρωτογενή πηγή ενέργειας, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Η καύση υδρογόνου σε μια θερμική μηχανή μπορεί να παράγει εκπομπές NO<sub>x</sub>, ειδικά υπό συνθήκες λιτής καύσης που στοχεύουν στην αύξηση της απόδοσης καυσίμου, και ενδεχομένως N<sub>2</sub>O παρουσία συστημάτων μετεπεξεργασίας NO<sub>x</sub> όμως η συνολική επίδραση

του υδρογόνου μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερη από αυτό των συμβατικών ορυκτών καυσίμων.

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 24 παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές ηλεκτρόλυσης όπου η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στη διαδικασία παραγωγής υδρογόνου προέρχεται από διαφορετικά πηγές. Στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης, οι εκπομπές WTT κυμαίνονται από 3.6 έως 499.6 g CO<sub>2</sub> eq/MJ.

<b>Electrolysis path</b>	<b>WTT (gCO<sub>2</sub> eq/MJ fuel)</b>
Electricity from EU-mix, on-site electrolysis	175.2
Electricity from EU-mix, central electrolysis pipeline transport	174.8
Wind electricity, central electrolysis, pipeline transport	9.5
Wind electricity, central reforming, hydrogen liquefaction, liquid hydrogen road transport to retail site, hydrogen cryo-compression in to vehicle tank	3.6
Coal EU-mix, conventional power plant, Central Electrolysis, Liquefaction, Road transport	499.6
Coal EU-mix, electrolysis on-site	446.5
Nuclear energy, on-site electrolysis	6.2

Εικόνα 25: Εκπομπές GHG (CO<sub>2</sub> eq) για διαφορετικές μεθόδους ηλεκτρόλυσης για παραγωγή συμπιεσμένου υδρογόνου (Prussi, και συν., 2020)

### 2.3.3 Διαθεσιμότητα υδρογόνου στην παγκόσμια ναυτιλία

Το παγκόσμιο δυναμικό για παραγωγή πράσινου υδρογόνου είναι σημαντικό, υπερβαίνοντας τους γεωγραφικούς περιορισμούς. Η ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, η οποία αποτελεί προϋπόθεση για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού, μπορεί να παραχθεί σε πολλές τοποθεσίες παγκοσμίως, ειδικά σε περιοχές με ευνοϊκές συνθήκες αιολικής ενέργειας και ηλιακής ακτινοβολίας. Τα οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε αυτές τις τοποθεσίες θα αντισταθμίζε σημαντικά τις πρόσθετες δαπάνες που συνδέονται με τις διηπειρωτικές μεταφορές φορέων ανανεώσιμης ενέργειας. Επομένως, μια παγκόσμια προοπτική για την ικανότητα παραγωγής πράσινου υδρογόνου είναι πιο διορατική από το να εστιάζει αποκλειστικά στην Ευρώπη.

Ωστόσο, η ισχύς ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην Ευρώπη, από το 2019, ήταν 475 GW, με την αιολική, την ηλιακή και την υδροηλεκτρική ενέργεια να συμβάλλουν σημαντικά σε αυτό το ποσοστό (Errard, et al., 2021). Σύμφωνα με το πακέτο «Fit for 55» της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το οποίο στοχεύει στην αύξηση του στόχου της ΕΕ για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από 32% σε 40% έως το 2030, υπάρχει επιτακτική ανάγκη να επιταχυνθεί η ανάπτυξη της αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον, η πρωτοβουλία FuelEU Maritime, ενθαρρύνει τη χρήση ανανεώσιμων καυσίμων μη βιολογικής προέλευσης. Αυτή η πρωτοβουλία υποχρεώνει τα κράτη μέλη να διασφαλίσουν τη διαθεσιμότητα της απαραίτητης υποδομής για αυτά τα καύσιμα στα λιμάνια.

Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Ένωση φιλοδοξεί να δημιουργήσει 40 GW ισχύος ηλεκτρόλυσης έως το έτος 2030. Σύμφωνα με τα τελευταία δεδομένα, τα κράτη μέλη έχουν δεσμευτεί να επιτύχουν 34 GW αυτής της ισχύος έως το 2030 (AURORA, 2021).

Η εκτίμηση της μελλοντικής διαθεσιμότητας πράσινου υδρογόνου για την παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις λόγω διαφόρων παραγόντων όπως η δυναμική της αγοράς, οι επενδυτικές τάσεις της βιομηχανίας και οι τεχνολογικές εξελίξεις στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την ηλεκτρόλυση.

Η προβλεπόμενη ζήτηση ενέργειας για την παγκόσμια θαλάσσια ναυτιλία αναμένεται να είναι μεταξύ 12.1 και 14.2 exajoules (EJ) έως το 2030 και θα μπορούσε να αυξηθεί σε 10.2-23.2 EJ έως το 2050 (CE Delft & RH DHV, 2020) (IMO, 2020). Εάν το υδρογόνο πρόκειται να είναι το μοναδικό καύσιμο για τη ναυτιλία, και υποθέτοντας μια γραμμική πρόοδο της ζήτησης, η παγκόσμια ανάγκη για υδρογόνο θα μπορούσε να φτάσει τους 93-156 Mt/έτος έως το 2040. Αυτή η απαίτηση υπερβαίνει κατά πολύ τη δυνητική παραγωγή όλων των τρεχόντων έργων ηλεκτρολύτη μαζί. Από τον Οκτώβριο του 2021, η ανακοινωθείσα

παγκόσμια ικανότητα παραγωγής ηλεκτρολύτη ήταν περίπου 260 (GW), όπως αναφέρθηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA, 2021).

Η έκθεση της Auroga τον Μάιο του 2021 υπολόγιζε τη παγκόσμια ικανότητα ηλεκτρόλυσης μέχρι το 2040 σε περίπου 213.5 GW, με το 85% αυτής να βρίσκεται στην Ευρώπη (AURORA, 2021). Με 213.5-260 GW ικανότητα ηλεκτρόλυσης που λειτουργεί μεταξύ 4000 και 6000 ωρών ετησίως, είναι εφικτή η παραγωγή 17-30 Mt/έτος πράσινου υδρογόνου. Αυτό το επίπεδο παραγωγής είναι σημαντικά υψηλότερο από την παγκόσμια ικανότητα των 0.3 GW που καταγράφηκε το 2020 και ξεπερνά τη συνολική προγραμματισμένη ισχύ των 16.7 GW για την περίοδο 2021-2026, η πλειοψηφία της οποίας συγκεντρώνεται στην Κίνα, τη Χιλή, την Ισπανία και την Αυστραλία.

Για να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις του ναυτιλιακού τομέα που θα λειτουργεί πλήρως με υδρογόνο, υπολογίζεται ότι θα χρειαζόταν 1190-1330 GW δυναμικότητας ηλεκτρόλυσης. Αυτή η δυναμικότητα θα βασίζεται σε μια υπόθεση ενεργειακής απόδοσης 65% και 4000-6000 ώρες πλήρους φορτίου για τους ηλεκτρολύτες. Κατά συνέπεια, για να υποστηριχθεί αυτό το επίπεδο παραγωγής υδρογόνου, θα απαιτούνται 4760-7990 τεραβατώρες (TWh) ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έως το 2040.

Η σύγκριση αυτών των στοιχείων με την τρέχουσα παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η οποία ήταν περίπου 6.600 TWh το 2018 (Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, καταδεικνύει τη σημαντική κλίμακα ανάπτυξης που απαιτείται (IRENA, 2020). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της τρέχουσας παραγωγής προέρχεται από την υδροηλεκτρική ενέργεια (63%), με την αιολική (19%), τη βιοενέργεια (8%), την ηλιακή (9%) και τη γεωθερμία (1%) να συμβάλλουν το υπόλοιπο.

Για να διευκολυνθεί η μετάβαση της ναυτιλιακής βιομηχανίας στο πράσινο υδρογόνο, είναι προφανές ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θα πρέπει να υπερδιπλασιαστεί. Αυτή η αύξηση πρέπει επίσης να συγχρονιστεί με την αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε άλλους κλάδους, γεγονός που αποτελεί σημαντική πρόκληση.



Item/Aspect	Required*		Available in 2040		Unit
	Min	Max	Min	Max	
Renewable electricity	4,760	7,990	15,000	30,000	TWh/year
Electrolyser capacity	1,190	1,330	213.5	260	GW
Green hydrogen	93	156	17	30	Mt/year

Εικόνα 26: Διαθεσιμότητα πράσινου υδρογόνου, ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και ικανότητας ηλεκτρολύσης για την παγκόσμια ναυτιλία το 2040 (EMSA, 2023)

### 2.3.4 Κινητήρες υδρογόνου

Ο ναυτιλιακός κλάδος αναζητώντας ενεργά λύσεις για να μειώσει το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, αναδεικνύει το υδρογόνο ως κορυφαίο εναλλακτικό καύσιμο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη κινητήρων πρόωσης που θα επιτρέπουν τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου. Οι τύποι κινητήρων πλοίων που θα μπορούσαν να λειτουργούν με υδρογόνο, με τις λειτουργικές τους ιδιαιτερότητες και τις προκλήσεις που σχετίζονται με τον καθένα είναι:

- Συστήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Systems): Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, με το νερό να είναι το μόνο υποπροϊόν. Τα πλοία που τροφοδοτούνται από κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες για πρόωση, προσφέροντας μια αθόρυβη, αποτελεσματική και με μηδενικές εκπομπές ρύπων λύση. Αν και πολλά υποσχόμενο, το τρέχον κόστος και η πολυπλοκότητα των συστημάτων κυψελών καυσίμου, μαζί με την ανάγκη για καθαρό υδρογόνο και μια εκτεταμένη υποδομή ανεφοδιασμού, θέτουν σημαντικές προκλήσεις στην ευρεία υιοθέτησή τους (BAUMULLER, 2022). Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5 της παρούσης εργασίας.
- Μηχανές εσωτερικής καύσης προσαρμοσμένες για υδρογόνο (Internal Combustion Engines (ICE) Adapted for Hydrogen): Το υδρογόνο μπορεί να καεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης που έχουν τροποποιηθεί για να χειρίζονται τις ιδιότητές του. Αυτοί οι κινητήρες μπορούν να λειτουργούν αποκλειστικά με υδρογόνο ή μπορεί να είναι κινητήρες διπλού καυσίμου που χρησιμοποιούν επίσης παραδοσιακά καύσιμα. Οι τροποποιήσεις σε υπάρχοντες κινητήρες για χρήση υδρογόνου μπορούν να

μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές. Ωστόσο, οι προκλήσεις περιλαμβάνουν τη διασφάλιση επαρκούς ισχύος εξόδου και τη διαχείριση της υψηλής ταχύτητας καύσης του υδρογόνου (MAN energy solutions, 2023).

- Κινητήρες διπλού καυσίμου υδρογόνου/ντίζελ (Hydrogen/Diesel Dual-Fuel Engines): Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται αυτήν τη στιγμή και αντιπροσωπεύουν μια μεταβατική τεχνολογία. Μπορούν να λειτουργούν με μείγμα ντίζελ και υδρογόνου, επιτρέποντας σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub>. Η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για υπάρχοντα πλοία και μπορεί να βοηθήσει στην άμεση επίτευξη στόχου μείωσης των εκπομπών, καθώς ωριμάζουν οι υποδομές παραγωγής υδρογόνου και ανεφοδιασμού (Maritime Foundation UK, 2021).
- Ειδικό κινητήρες καύσης υδρογόνου (Dedicated Hydrogen Combustion Engines): Οι εταιρείες ερευνούν κινητήρες σχεδιασμένους ειδικά για χρήση υδρογόνου, οι οποίοι θα μπορούν να λειτουργούν 100% με υδρογόνο. Αυτοί οι κινητήρες στοχεύουν να παρέχουν μια λύση πρόωσης υψηλής απόδοσης, μηδενικών εκπομπών και αναμένεται να είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για πλοία που λειτουργούν σε ελεγχόμενες εκπομπές ρύπων. Αντιμετωπίζουν προκλήσεις όπως η ανάγκη για μεγάλα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου και η διασφάλιση της ανθεκτικότητας του κινητήρα κατά την καύση υδρογόνου σε υψηλή θερμοκρασία (MAN energy solutions, 2023).
- Τετράχρονοι κινητήρες υδρογόνου (Hydrogen Four-Stroke Engines): Τετράχρονοι κινητήρες για θαλάσσια χρήση αναπτύσσονται για να λειτουργούν με υδρογόνο. Αυτοί οι κινητήρες είναι κατάλληλοι για διάφορους τύπους πλοίων και μπορούν να παρέχουν τόσο πρόωση όσο και βοηθητική ισχύ. Η ανάπτυξη τέτοιων κινητήρων επικεντρώνεται στην επίτευξη αποτελεσματικής καύσης, στη διαχείριση της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου και στη διασφάλιση της συμβατότητας με τα υπάρχοντα σχέδια πλοίων.
- Κινητήρες με ανάφλεξη με σπινθήρα (Spark-Ignited (SI) Engines): Αυτοί οι κινητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούν εισαγωγή υδρογόνου χαμηλής πίεσης, είναι μια προσαρμογή των παραδοσιακών κινητήρων αερίου. Προσφέρουν τη δυνατότητα μετασκευής των υπάρχοντων πλοίων και θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια πιο άμεση λύση για τη μείωση των εκπομπών. Η τεχνολογία είναι προσανατολισμένη σε πλοία με προβλέψιμες διαδρομές και λειτουργίες, όπως ferry boats και θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων.
- Υβριδικά συστήματα υδρογόνου (Hybrid Hydrogen Propulsion): Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει κυψέλες καυσίμου υδρογόνου με μπαταρίες ή άλλα συστήματα

αποθήκευσης ενέργειας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Επιτρέπει στα πλοία να χρησιμοποιούν την άμεση παροχή ισχύος μπαταριών για ελιγμούς, ενώ βασίζονται στη συνεχή παροχή ενέργειας από το υδρογόνο για μεγαλύτερες αποστάσεις. Αναλυτικότερα περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας εργασίας (BAUMULLER, 2022).

Η υιοθέτηση του υδρογόνου στο ναυτιλιακό τομέα απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια από κατασκευαστές κινητήρων, ναυπηγούς, προμηθευτές καυσίμων και ρυθμιστικούς φορείς για να διασφαλιστεί ότι τα οφέλη αυτής της καθαρής πηγής ενέργειας μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς να τεθεί σε κίνδυνο η ασφάλεια και η οικονομική βιωσιμότητα.

### 2.3.5 Μηχανές εσωτερικής καύσης- Σχεδιασμός κινητήρα υδρογόνου

Η επιλογή του κύκλου καύσης είναι ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό κινητήρων και συστημάτων παροχής καυσίμου για χρήση υδρογόνου σε θαλάσσιες εφαρμογές, επηρεάζοντας άμεσα την απόδοση, τις εκπομπές και το συνολικό κόστος. Υπάρχουν δύο κύριες έννοιες: κινητήρες αερίου χαμηλής πίεσης (LP) που χρησιμοποιούν τον κύκλο Otto και κινητήρες αερίου υψηλής πίεσης (HP) που χρησιμοποιούν τον κύκλο Diesel. Οι κινητήρες LP DF εναλλάσσονται μεταξύ του κύκλου Otto στη λειτουργία αερίου και του κύκλου ντίζελ στη λειτουργία μαζούτ, ενώ οι κινητήρες HP DF χρησιμοποιούν σταθερά τον κύκλο Diesel και για τους δύο τύπους καυσίμου. Και στα δύο σχέδια, η ανάφλεξη αερίου επιτυγχάνεται μέσω πιλοτικής έγχυσης υγρού καυσίμου.

Ο κύκλος Otto, που χρησιμοποιείται συνήθως σε τετράχρονους κινητήρες με πιέσεις τροφοδοσίας αερίου περίπου 5 bar, χαρακτηρίζεται από προαναμεμιγμένη καύση. Αυτή η μέθοδος, ωστόσο, μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερους χρόνους για την επίτευξη της επιθυμητής ισχύος εξόδου λόγω της ανάγκης για ελεγχόμενες αναλογίες αέρα/καυσίμου για την αποφυγή κρουσμάτων ή αστοχιών. Όταν χρησιμοποιείται καθαρό υδρογόνο, η υψηλή του ικανότητα απελευθέρωσης θερμότητας και τα μεγάλα όρια ευφλεκτότητας μπορούν να επιβάλλουν υψηλά θερμικά φορτία και ενδεχομένως να αυξήσουν τις εκπομπές NOx. Αυτοί οι παράγοντες παρουσιάζουν σχεδιαστικές προκλήσεις, ιδιαίτερα στη διαχείριση θερμικών φορτίων στα εξαρτήματα του θαλάμου καύσης και στο λιπαντικό.

Συγκεκριμένα, ο κύκλος Otto έχει περιορισμούς όσον αφορά τη μέγιστη Μέση Αποτελεσματική Πίεση Πέδησης (BMEP) και την ευαισθησία στην ποιότητα του αερίου, όπως ο αριθμός μεθανίου (MN). Η ολίσθηση μεθανίου, η απελευθέρωση άκαυτου καυσίμου στην ατμόσφαιρα, είναι ένα σημαντικό ζήτημα σε αυτόν τον κύκλο, συμβάλλοντας στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η υψηλότερη αντιδραστικότητα και η ταχύτητα της

φλόγας του υδρογόνου θα μπορούσαν να μειώσουν τις αστοχίες και τις ολισθήσεις του καυσίμου, μειώνοντας ενδεχομένως τις εκπομπές. Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης του υδρογόνου επιτρέπει τον σχεδιασμό κινητήρων με υψηλότερους λόγους συμπίεσης σε σύγκριση με τους κινητήρες με καύσιμο LNG.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες, ο κύκλος Otto μπορεί να μην είναι πάντα η βέλτιστη επιλογή για αέρια καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης όπως η μεθανόλη, το LPG, το υδρογόνο και η αμμωνία, όπου η μείωση ισχύος του κινητήρα μπορεί να μην είναι βιώσιμη λύση. Αντίθετα, ο κύκλος Diesel προσφέρει καλύτερη ευελιξία καυσίμου, αποφεύγει το χτύπημα και διατηρεί τη μέγιστη απόδοση του κινητήρα. Ωστόσο, απαιτεί τη δημιουργία υψηλής πίεσης ψεκασμού για το υδρογόνο, η οποία μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος του συστήματος παροχής καυσίμου. Μέχρι σήμερα, κανένας κινητήρας κύκλου ντίζελ HP που λειτουργεί με υδρογόνο δεν έχει σχεδιαστεί για τη ναυτιλιακή βιομηχανία και οι επιπτώσεις στο κόστος ενός τέτοιου συστήματος παραμένουν άγνωστες. Έτσι, οι κινητήρες κύκλου Otto αναμένεται να είναι περισσότερο κυρίαρχοι σε μελλοντικές εφαρμογές υδρογόνου.

### 2.3.6 Προκλήσεις εφαρμογής του υδρογόνου ως καυσίμου στα πλοία

Η υιοθέτηση του υδρογόνου ως καυσίμου στη ναυτιλία συνοδεύεται από πολλές προκλήσεις, παρακάτω συνοψίζονται οι σημαντικότερες από αυτές.

Ασφάλεια χρήσης:

- Φυσικές ιδιότητες του υδρογόνου: Λόγω του χαμηλού μοριακού του βάρους και της υψηλής διαχυτότητας, το υδρογόνο θέτει μοναδικές προκλήσεις στον περιορισμό και τον χειρισμό του. Το ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας του (4% έως 75% στον αέρα) και η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης αυξάνουν τον κίνδυνο τυχαίας πυρκαγιάς ή εκρήξεων.
- Ευθραυστότητα υλικού: Το υδρογόνο μπορεί να προκαλέσει ευθραυστότητα σε ορισμένα μέταλλα, οδηγώντας σε αστοχία υλικού. Αυτό απαιτεί την επιλογή υλικών συμβατών με υδρογόνο για συστήματα αποθήκευσης και μεταφοράς (Reinsch, et al., 2021).

Προσαρμογές συστήματος καυσίμου:

- Κυψέλες καυσίμου: Η πιο αποτελεσματική μέθοδος παραγωγής ενέργειας υδρογόνου στα πλοία είναι μέσω κυψελών καυσίμου. Ωστόσο, η απόδοση των κυψελών καυσίμου μπορεί να ποικίλλει, με ορισμένους τύπους να επιτυγχάνουν έως και 60% απόδοση.

- Απώλειες μετατροπής ενέργειας: Κάθε βήμα της μετατροπής ενέργειας, από την παραγωγή υδρογόνου έως τη χρήση του στις κυψέλες καυσίμου, συνεπάγεται απώλειες ενέργειας. Αυτός ο παράγοντας είναι κρίσιμος για τη συνολική ενεργειακή απόδοση της αλυσίδας εφοδιασμού υδρογόνου (Reinsch, et al., 2021).

#### Ρυθμιστικό Πλαίσιο:

- Διαδικασία Εναλλακτικού Σχεδιασμού: Αυτή η διαδικασία, σύμφωνα με το Κεφάλαιο II-2 της SOLAS και τις Κατευθυντήριες γραμμές του IMO, απαιτεί από τους ιδιοκτήτες έργων να αποδείξουν πώς διαχειρίζονται τους κινδύνους σχεδιασμού. Είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί ολοκληρωμένη σχεδίαση βάσει κινδύνου και βελτιστοποίηση της ασφάλειας.
- Ποικίλες ερμηνείες: Διαφορετικά κράτη σημαίας και λιμάνια μπορεί να έχουν διαφορετικές ερμηνείες και απαιτήσεις, γεγονός που μπορεί να περιπλέξει τη συμμόρφωση για διεθνείς ναυτιλιακές δραστηριότητες.

#### Υλοποίηση και κλιμάκωση:

- Ρυθμιστική πλοήγηση στο τοπίο: Η πολυπλοκότητα του ρυθμιστικού τοπίου, που περιλαμβάνει κανονισμούς του IMO και διάφορους εθνικούς και περιφερειακούς κανόνες, αποτελεί σημαντική πρόκληση.
- Τεχνολογική ωριμότητα: Ενώ η τεχνολογία υδρογόνου είναι ώριμη σε άλλους τομείς, η προσαρμογή της στις θαλάσσιες συνθήκες, όπως ο περιορισμένος χώρος και η δυσκολία εκκένωσης, είναι πρόκληση (SAFETY4SEA, 2022).

#### Παραγωγή και Διανομή Υδρογόνου:

- Μέθοδοι Παραγωγής: Οι τρέχουσες κυρίαρχες μέθοδοι όπως η αναμόρφωση με ατμό μεθανίου παράγουν σημαντικές εκπομπές CO<sub>2</sub>. Η ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές είναι πιο καθαρή αλλά πιο ακριβή.
- Διανομή: Η μεταφορά υδρογόνου με αγωγούς είναι οικονομικά αποδοτική αλλά γεωγραφικά περιορισμένη. Το δίκτυο με σωλήνες υψηλής πίεσης και τα δεξαμενόπλοια υδροποιημένου υδρογόνου επιτρέπουν ευρύτερη διανομή αλλά συνεπάγονται υψηλότερο κόστος και πολυπλοκότητα.

#### Παγκόσμια Εφοδιαστική Αλυσίδα και Υποδομή:

- Ανάπτυξη Εφοδιαστικής Αλυσίδας: Η ανάπτυξη παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού υδρογόνου είναι εκκολαπτόμενη. Η μορφή με την οποία θα μεταφερθεί το υδρογόνο (συμπιεσμένο, υγρό, αμμωνία, μεθανόλη) επηρεάζει το κόστος της αλυσίδας εφοδιασμού και τις απαιτήσεις υποδομής.
- Ανάγκες υποδομής: Η δημιουργία υποδομής για αποθήκευση, ανεφοδιασμό και διανομή υδρογόνου σε λιμάνια παγκοσμίως είναι μια σημαντική πρόκληση που απαιτεί σημαντικές επενδύσεις (Frithiof, 2021).

#### Κόστος και Διαθεσιμότητα:

- Μεταβλητότητα κόστους: Το κόστος παραγωγής του υδρογόνου, ιδιαίτερα του πράσινου υδρογόνου, είναι σήμερα υψηλότερο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι σημαντικός παράγοντας σε αυτό.
- Διαθεσιμότητα και επεκτασιμότητα: Η κλιμάκωση της παραγωγής υδρογόνου για την κάλυψη των απαιτήσεων της ναυτιλιακής βιομηχανίας απαιτεί σημαντικές εξελίξεις στις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μείωση του κόστους παραγωγής πράσινου υδρογόνου (Frithiof, 2021).

Αντιμετωπίζοντας πλήρως αυτές τις προκλήσεις, η ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να μεταβεί αποτελεσματικά στο υδρογόνο ως βιώσιμο καύσιμο, συμβάλλοντας στις παγκόσμιες προσπάθειες απαλλαγής από τον άνθρακα. Ωστόσο, αυτή η μετάβαση θα απαιτήσει συντονισμένες προσπάθειες μεταξύ των ενδιαφερομένων του κλάδου, των κυβερνήσεων και των διεθνών ρυθμιστικών φορέων.

Μια επίσης σημαντική πρόκληση σχετικά με το υδρογόνο αφορά την ενέργεια που απαιτείται για την υγροποίησή του. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την υγροποίηση αντιπροσωπεύει περίπου το 30% της ενέργειας στο τελικό καύσιμο (Grahn, 2021). Αυτή η διαδικασία συνδέεται επίσης με υψηλό κόστος κεφαλαίου (Slade, et al., 2014). Το υγροποιημένο υδρογόνο αποθηκεύεται σε μονωμένες κρυογονικές δεξαμενές αποθήκευσης, διαθέσιμες σε διάφορα μεγέθη. Ωστόσο, οι περισσότερες μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου χρησιμοποιούνται επί του παρόντος κυρίως στη βιομηχανία διαστημικών σκαφών. Η ανάπτυξη τέτοιων δεξαμενών για θαλάσσια χρήση αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη πρόκληση για τον ρόλο του υδρογόνου ως μελλοντικού ναυτιλιακού καυσίμου. Ακόμη και στην υγροποιημένη του κατάσταση, το υδρογόνο έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, περίπου  $10.000 \text{ MJ/m}^3$ , η οποία είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με τις ενεργειακές πυκνότητες του LNG και της μεθανόλης, περίπου  $16.000 \text{ MJ/m}^3$

και 22.000 MJ/m<sup>3</sup> αντίστοιχα (Bengtsson, S., 2012). Η αποθήκευση υγρού υδρογόνου, το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία -253 °C, απαιτεί ισχυρή θερμομόνωση για τη μείωση του βρασμού, μια πρόκληση με ακανόνιστα λειτουργικά πρότυπα ειδικά για πλοία.

Το υδρογόνο ως καύσιμο δεν απελευθερώνει CO<sub>2</sub> κατά την καύση ή όταν χρησιμοποιείται σε κυψέλη καυσίμου. Ωστόσο, CO<sub>2</sub> μπορεί να απελευθερωθεί κατά την παραγωγή υδρογόνου. Η απόδοση του κύκλου ζωής του υδρογόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο παραγωγής – είτε προέρχεται από ορυκτές είτε από ανανεώσιμες πηγές – και τις εκπομπές των μετατροπένων ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα πλοία. Εάν χρησιμοποιείται υδρογόνο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> και σωματιδίων εμφανίζονται κατά την καύση.

Πίνακας 2: Εταιρείες/έργα που χρησιμοποιούν συστήματα πρόωσης H<sub>2</sub> σε μηχανές εσωτερικής καύσης (EMSA, 2023)

Εταιρεία / έργο	Σύστημα πρόωσης	Τύπος Πλοίου	Τύπος Έργου	Έτος Έναρξης	Σχόλια
Hydroville (CMB Tech)	Εσωτερικής Καύσης Μηχανή (DF)	Μικρό Επιβατηγό Πλοίο	Ολοκληρωμένο	2017	Επιβατηγό φέρι, δοκιμαστικό πλοίο, εφοδιασμένο με κινητήρες ABC Engines Behydro DF
ABC Engines (CMB Tech) Behydro	Εσωτερικής Καύσης Μηχανή (DF)	Πλοία Γενικής Χρήσης	Ανακοινώθηκε	2020	Διαθέσιμοι κινητήρες DF (85% H <sub>2</sub> ), ανακοινώθηκαν μονοκαύσιμοι κινητήρες H <sub>2</sub>
HydroBingo (CMB Tech)	Εσωτερικής Καύσης Μηχανή (DF)	Φέρι	Ολοκληρωμένο	2021	Ολοκληρωμένο έργο
Hydrotug (CMB Tech)	Εσωτερικής Καύσης Μηχανή (DF)	Ρυμουλκό	Υπό Ανάπτυξη	2022	Υπό ανάπτυξη
Man Energy Solutions	Εσωτερικής Καύσης Μηχανή	Πλοία Γενικής Χρήσης	Ανακοινώθηκε	Άγνωστο	Ανακοινώθηκε το έργο
J-ENG, Kawasaki Heavy Industries, Yanmar Power Technology	Εσωτερικής Καύσης Μηχανή	Σε υπηρεσία πλοίο (δεν έχει προσδιοριστεί)	Δοκιμαστική ανακοίνωση	Άγνωστο	Δοκιμαστική ανακοίνωση για πλοίο σε υπηρεσία

Εταιρεία / έργο	Σύστημα πρόωσης	Τύπος Πλοίου	Τύπος Έργου	Έτος Έναρξης	Σχόλια
HyMethShip Project	Εσωτερικής Καύσης Μηχανή	Φέρι, πλοία εμπορευματοκιβωτίων και κρουαζιέρας	Υπό μελέτη	Άγνωστο	Το πλοίο ανεφοδιάζεται με μεθανόλη στο λιμάνι. Εν πλω, το υδρογόνο λαμβάνεται από τη μεθανόλη μέσω διαδικασίας ατμομετατροπής και χρησιμοποιείται για την πρόωση του πλοίου.

### 2.3.7 Μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου – Εξέταση περίπτωσης

Εξετάζοντας την εμπειρία που έχει συσσωρευτεί μέχρι σήμερα, τις προκλήσεις που έχουν προκύψει κατά την ανάπτυξη και την εφαρμογή των κινητήρων καύσης υδρογόνου και τις προοπτικές που ανοίγονται για το μέλλον της θαλάσσιας κινητικότητας κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αναφορά σε περίπτωση της εταιρείας MAN. Αρκετές εταιρείες και κοινοπραξίες αναπτύσσουν κινητήρες καύσης υδρογόνου για θαλάσσιες εφαρμογές. Παρ' όλα αυτά, η εταιρεία MAN αναφέρει ότι διαθέτει 30 χρόνια εμπειρίας στην καύση υδρογόνου, με τις πρώτες έρευνες σε κινητήρες Otto να ξεκινούν στις αρχές του '90 και το υδρογόνο να χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε κινητήρες ντίζελ για λεωφορεία στο τέλος της ίδιας δεκαετίας (MAN Energy Solutions, 2022).

Η επικρατούσα άποψη είναι ότι το υδρογόνο έχει μικρότερη αντοχή στην αυτανάφλεξη σε σχέση με το LNG ή το CNG, επομένως οι κύριες προκλήσεις αφορούν τον χαμηλό αριθμό μεθανίου, τη χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης και την υψηλή ταχύτητα της φλόγας, η οποία σημαίνει υψηλή αύξηση της πίεσης. Όσον αφορά τη μεταχείριση των καυσαερίων, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> είναι στο ίδιο ή και χαμηλότερο επίπεδο των υφιστάμενων κινητήρων διπλού καυσίμου και θα μπορούσαν να μειωθούν ακόμα περισσότερο σε ελάχιστα επίπεδα με τη λύση SCR της MAN, εξασφαλίζοντας συμμόρφωση με μελλοντικά πρότυπα εκπομπών.

Για θαλάσσια χρήση, δύο περιπτώσεις κινητήρων εξετάζονται αυτή τη στιγμή στα εργαστήρια της εταιρείας. Η Φάση I είναι ένας κινητήρας διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης που λειτουργεί με περιορισμένο μερίδιο ενέργειας H<sub>2</sub> και μειωμένη ισχύ. Προσφέρει ευελιξία ενώ μειώνει τον κίνδυνο προβλημάτων προμήθειας ή συστήματος καυσίμου H<sub>2</sub>, με το πετρέλαιο ή το LNG να λειτουργεί ως εναλλακτική λύση που θα μπορούσε επίσης να είναι οικονομικά ελκυστική. Θα λειτουργεί χωρίς εκπομπές SO<sub>x</sub> και CO<sub>2</sub> κατά τη φάση του H<sub>2</sub>. Ανάλογα με τη ζήτηση της αγοράς, αυτός ο κινητήρας θα μπορούσε να είναι διαθέσιμος το 2023.



Η εφαρμογή Φάσης II είναι ένας κινητήρας διπλού καυσίμου H<sub>2</sub> με ενδοκυλινδρική παροχή καυσίμου που αναπτύχθηκε με έμφαση στην απόδοση και την πλήρη ισχύ στη λειτουργία H<sub>2</sub>. Θα είναι πλήρως ευέλικτος και θα απαιτεί μόνο καύσιμο πιλότου, το οποίο θα μπορούσε να προέρχεται από πράσινο, συνθετικό πετρέλαιο (Fischer-Tropsch). Ανάλογα με τη ζήτηση της αγοράς, αυτός θα μπορούσε να είναι διαθέσιμος το 2026, όταν η προμήθεια H<sub>2</sub> αναμένεται να είναι πιο ευρέως διαθέσιμη (MAN Energy Solutions, 2022).

Η εταιρεία συγκρίνοντας τις τεχνολογίες ICE με τις τουρμπίνες αερίου και τις κυψέλες καυσίμου πρωτονίων (PEM) / στερεών οξειδίων (SOFC) σε μια σειρά παραμέτρων αναφέρουν ότι τα ICE υδρογόνου προσφέρουν μια ελκυστική επιλογή σε σύγκριση με τις κυψέλες καυσίμου λόγω των πλεονεκτημάτων σε κόστος, πυκνότητα ισχύος, ευελιξία καυσίμου και αξιοπιστία. Βάσει της ιστορικής εμπειρίας, η διάρκεια ζωής των ICE για πάνω από 30 χρόνια (με τακτική συντήρηση) ξεπερνά κατά πολύ τη διάρκεια ζωής των κινητήρων κυψελίδων καυσίμου αναγνωρίζοντας έναν ρόλο για τις εφαρμογές κυψελίδων καυσίμου στη χαμηλότερη περιοχή ισχύος.

### Zero-Carbon Fuel Monitor

Η κατανόηση της διαθεσιμότητας και της τιμολόγησης των εναλλακτικών καυσίμων είναι καθοριστικός παράγοντας για τους πλοιοκτήτες όταν εξετάζουν τη μετατροπή υφιστάμενων πλοίων. Ενώ το σκεπτικό για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων είναι ευρέως αναγνωρισμένο, οι μεθοδολογίες υιοθέτησης παραμένουν ασαφείς. Οι αποφάσεις αυτές βασίζονταν ιστορικά σε προβλέψεις κόστους καυσίμων για νέες κατασκευές και τροποποιήσεις. Ωστόσο, καθώς πολλά πιθανά καύσιμα δεν είναι ακόμη διαθέσιμα σε εμπορική κλίμακα, η αξιοπιστία αυτών των προβλέψεων μειώνεται σημαντικά.

Αυτό το στοιχείο αβεβαιότητας υπογραμμίζει το αυξανόμενο ενδιαφέρον στην αγορά εναλλακτικών καυσίμων. Η μετατροπή πλοίων παρέχει στους ιδιοκτήτες την ευελιξία να προωθήσουν τους στόλους τους χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες επιλογές καυσίμων, ενώ διατηρεί ανοιχτή τη δυνατότητα μετάβασης σε εναλλακτικά καύσιμα, όταν τεκμηριώνεται η βιωσιμότητά τους. Ωστόσο, η σκοπιμότητα της μετασκευής συνδέεται περίπλοκα με το συγκεκριμένο τοπικό κόστος και τη διαθεσιμότητα αυτών των καυσίμων.

Για να αντιμετωπίσει αυτές τις αβεβαιότητες, η Lloyd's Register έχει εισαγάγει δύο εργαλεία: το Zero-Carbon Fuel Monitor και το First Movers Framework. Το Zero-Carbon Fuel Monitor αξιολογεί την ετοιμότητα των ναυτιλιακών καυσίμων με μια γενική έννοια, ενώ το First Movers Framework βελτιώνει αυτές τις αξιολογήσεις.

Το Zero-Carbon Fuel Monitor είναι ένα τεκμηριωμένο εργαλείο που έχει σχεδιαστεί για την αξιολόγηση των πιο υποσχόμενων καυσίμων και τεχνολογιών μηδενικού άνθρακα. Στόχος του είναι να καθοδηγήσει τη ναυτιλιακή βιομηχανία προς τις μηδενικές εκπομπές έως το 2050. Απεικονίζει την τρέχουσα κατάσταση ανάπτυξης και παρακολουθεί την πρόοδο προς λύσεις στο κλάδο της ναυτιλίας.

Το Zero-Carbon Fuel Monitor αντιμετωπίζει τρία κρίσιμα ερωτήματα για την απεξάρτηση από τον άνθρακα του παγκόσμιου στόλου:

Πόσο ώριμο είναι το καύσιμο και η σχετική τεχνολογία όσον αφορά την ασφάλεια, την επεκτασιμότητα και την αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα;

Είναι η επιχειρηματική υπόθεση αρκετά πειστική για να εξασφαλίσει επένδυση;

Είναι οι κοινότητες και οι οργανισμοί έτοιμοι να αγκαλιάσουν αυτή τη νέα λύση;

Το πλαίσιο λειτουργεί σε πέντε βασικά στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας, που εκτείνονται από την εξόρυξη φυσικών πόρων έως την πρόωση πλοίων. Σε κάθε στάδιο, ειδικοί από το Lloyd's Register εκχωρούν αξιολογήσεις για την τεχνολογία, τις επενδύσεις και την ετοιμότητα της κοινότητας (TRL, IRL και CRL, αντίστοιχα), αντλώντας από τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα δεδομένα.

Οι ενημερώσεις του Zero-Carbon Fuel Monitor γίνονται σύμφωνα με τα νέα ευρήματα. Τα πιο πρόσφατα επίπεδα ετοιμότητας είναι προσβάσιμα μέσω ενός διαδικτυακού πίνακα ελέγχου, ο οποίος περιλαμβάνει λεπτομερείς εξηγήσεις και στοιχεία που υποστηρίζουν τις αξιολογήσεις. Αυτός ο πίνακας εργαλείων, μαζί με περαιτέρω πληροφορίες για τα επίπεδα ετοιμότητας ανανεώσιμων πηγών αμμωνίας, μεθανόλης και μεθανίου, είναι διαθέσιμος στον ιστότοπο του Lloyd's Register.

## 2.4 Παρατηρήσεις – Σχολιασμός

Η μετάβαση της παγκόσμιας ναυτιλιακής βιομηχανίας σε βιώσιμα καύσιμα αποτελεί ένα διαρκή αγώνα, όπου κάθε εναλλακτικό καύσιμο —LNG, Μεθανόλη, E-Μεθανόλη και Υδρογόνο— παρουσιάζει ένα ξεχωριστό σύνολο δυνατοτήτων και προκλήσεων.

Το LNG, ως μεταβατικό καύσιμο, προσφέρει άμεσες μειώσεις στις εκπομπές CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα πλοίων. Η καθιερωμένη υποδομή ανεφοδιασμού καυσίμων και η τεχνολογική ωριμότητα το καθιστούν μια πρακτικά βραχυπρόθεσμη λύση. Ωστόσο, οι ανησυχίες σχετικά με την διαφυγή μεθανίου (slip methane) και τις εκπομπές αερίων κατά την ανάλυση του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένων εκείνων από την παραγωγή και τη μεταφορά, αμφισβητούν τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική του αποτελεσματικότητα. Η

κανονιστική αβεβαιότητα και η πιθανότητα να καταστεί απαρχαιωμένο καύσιμο καθώς αναδύονται πιο πράσινες τεχνολογίες εγείρουν προβληματισμό.

Η Μεθανόλη και η e-Μεθανόλη αποτελούν ξεχωριστή περίπτωση, με κύριο χαρακτηριστικό τους χαμηλότερους περιβαλλοντικούς κινδύνους από διαρροές και την συμβατότητα με την υπάρχουσα ναυτιλιακή υποδομή. Η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα της μεθανόλης, που απαιτεί μεγαλύτερους όγκους αποθήκευσης, αποτελεί πρόκληση σχεδιασμού για τα πλοία. Η e-Methanol, ενώ διαθέτει τα πλεονεκτήματα της μεθανόλης, αντιμετωπίζει υψηλότερο κόστος παραγωγής λόγω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των λιγότερο καθιερωμένων διαδικασιών παραγωγής της. Τα περιβαλλοντικά οφέλη της e-Methanol, ιδιαίτερα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη μακροπρόθεσμη επιλογή.

Το υδρογόνο ξεχωρίζει για τις δυνατότητές του και αντιμετωπίζεται ως το καύσιμο που θα φέρει επανάσταση στη ναυτιλία, προσφέροντας ουσιαστική απαλλαγή από τον άνθρακα, ειδικά στην πράσινη μορφή του. Η υπάρχουσα παγκόσμια αγορά υδρογόνου υποδηλώνει ετοιμότητα για κλιμάκωση, αλλά το καύσιμο αντιμετωπίζει σημαντικά εμπόδια στην αποθήκευση και την ενεργειακή πυκνότητα, που απαιτούν υψηλή συμπίεση και ψύξη για μεταφορά και αποθήκευση. Οι αλλαγές υποδομής που απαιτούνται για το υδρογόνο, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος παραγωγής του και την απαίτηση για αυστηρά μέτρα ασφαλείας λόγω της εξαιρετικά εύφλεκτης φύσης του, παρουσιάζουν αξιοσημείωτες προκλήσεις.

Η οικονομική βιωσιμότητα αυτών των καυσίμων ποικίλλει σημαντικά. Το τρέχον οικονομικό πλεονέκτημα του LNG πηγάζει από τις καθιερωμένες αλυσίδες εφοδιασμού και την τεχνολογική του ωριμότητα. Αντίθετα, τόσο η μεθανόλη όσο και η e-μεθανόλη, αν και ανταγωνιστικές, αντιμετωπίζουν προκλήσεις κόστους, με την e-μεθανόλη να είναι πιο ακριβή λόγω περιορισμένων κλιμάκων παραγωγής. Η οικονομική σκοπιμότητα του υδρογόνου παρεμποδίζεται επί του παρόντος από το υψηλό κόστος παραγωγής και υποδομής.

Κάθε καύσιμο αντιμετωπίζει επίσης μοναδικές ρυθμιστικές προκλήσεις όσο και ασφάλειας. Το LNG και η μεθανόλη απαιτούν προσεκτικό χειρισμό λόγω κινδύνων ευφλεκτότητας και τοξικότητας. Η e-Methanol, αν και είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον, διατηρεί τις ίδιες ανησυχίες ως προς την ασφάλεια. Το υδρογόνο, με την ιδιαίτερα εύφλεκτη φύση του, απαιτεί και αυτό την ανάπτυξη προηγμένων πρωτοκόλλων ασφαλείας.

Εκτός από αυτούς τους παράγοντες, η παγκόσμια ώθηση για απαλλαγή από τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και η τήρηση των διεθνών περιβαλλοντικών προτύπων είναι κινητήρια δύναμη στην επιλογή καυσίμων. Οι στόχοι μείωσης των εκπομπών του Διεθνούς

Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) και η δέσμευση της ναυτιλιακής βιομηχανίας σε αυτούς τους στόχους διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση των επιλογών καυσίμων.

Επομένως, η πορεία προς μια ναυτιλιακή βιομηχανία απελευθερωμένη από τις εκπομπές άνθρακα είναι πολύπλευρη. Στο άμεσο μέλλον, το LNG προσφέρει μια πρακτική λύση για τη μείωση των εκπομπών, ενώ η μεθανόλη και η e-Μεθανόλη παρέχουν μια γέφυρα προς πιο βιώσιμες επιλογές. Το υδρογόνο, παρά τις προκλήσεις του, έχει τις περισσότερες υποσχέσεις για ένα μέλλον μηδενικών εκπομπών, αλλά απαιτεί σημαντικές τεχνολογικές αναβαθμίσεις και ανάπτυξη των υποδομών του.

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων για την επιλογή του σωστού καυσίμου περιλαμβάνει μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τεχνολογικής ετοιμότητας, οικονομικής σκοπιμότητας, ζητημάτων ασφάλειας και κανονιστικής συμμόρφωσης. Η συνεργασία σε ολόκληρο τον κλάδο, η καινοτομία στην τεχνολογία και οι υποστηρικτικές πολιτικές είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική καθοδήγηση σε αυτή τη μετάβαση. Στο μέλλον είναι πιθανό να γίνει εφαρμογή ενός μείγματος αυτών των καυσίμων, με την εξέλιξη του κλάδου να υπαγορεύεται από τις εξελίξεις στην αντιμετώπιση των ειδικών προκλήσεων κάθε καυσίμου, ιδίως όσον αφορά τις υποδομές, το κόστος, την ασφάλεια και την περιβαλλοντική συμμόρφωση.

#### 3.1 Ο ρόλος του σχεδιασμού, των υλικών, της λίπανσης και της επίστρωσης στη βελτιστοποίηση πλοίων

Η μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) στη ναυτιλιακή βιομηχανία όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι επιτακτική ανάγκη που απαιτεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των διαφόρων αλληλένδετων παραγόντων. Σε αυτή την ενότητα επιδιώκεται να αναλυθεί η περίπλοκη σχέση μεταξύ του μεγέθους του σκάφους, του σχήματος του κύτους, των ελαφρών υλικών, της λίπανσης με αέρα και της επίστρωσης του κύτους, διευκρινίζοντας πώς αυτά τα στοιχεία συμβάλλουν συλλογικά στην επίτευξη σημαντικής μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις θαλάσσιες μεταφορές.

- **Μέγεθος πλοίου (Vessel Size):** Το μέγεθος του πλοίου παίζει καθοριστικό ρόλο στις στρατηγικές μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία. Αυτή η σχέση υποστηρίζεται μέσα από την οικονομική διάσταση των οικονομικών κλίμακας. Τα εμπειρικά δεδομένα δείχνουν σταθερά ότι τα μεγαλύτερα πλοία τείνουν να εμφανίζουν ανώτερες μετρήσεις ενεργειακής απόδοσης ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μεγαλύτερα πλοία μπορούν να καταναείμουν σταθερό κόστος σε μεγαλύτερη χωρητικότητα φορτίου, οδηγώντας σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ανά τόνο μίλι και στη συνέχεια σε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, τα σύγχρονα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα εξαιρετικά μεγάλα πλοία αργού πετρελαίου (ultra-large crude carriers, ULCC) και τα πολύ μεγάλα πλοία αργού πετρελαίου (very large crude carriers, VLCCs) αποτελούν παράδειγμα αυτής της τάσης μεταφέροντας αποτελεσματικά μεγάλους όγκους φορτίου μειώνοντας παράλληλα τις εκπομπές GHG ανά μονάδα φορτίου. Επιπλέον, οι εξελίξεις στον σχεδιασμό των πλοίων, όπως η υιοθέτηση της κατασκευής διπλού κύτους για βελτιωμένη ασφάλεια, έχουν συνδυαστεί με την τάση προς μεγαλύτερα πλοία, ενισχύοντας περαιτέρω τα διαπιστευτήρια βιωσιμότητας τους.
- **Υδροδυναμική απόδοση και βελτιστοποίηση σχήματος κύτους (Hydrodynamic Efficiency and Hull Shape Optimization):** Ο υδροδυναμικός σχεδιασμός του κύτους ενός πλοίου είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη μείωση των

εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η εκτεταμένη έρευνα στον τομέα αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της υδροδυναμικής απόδοσης και της ελαχιστοποίησης της αντίστασης. Τα μοντέρνα σχέδια κύτους ενσωματώνουν χαρακτηριστικά όπως απλοποιημένες φόρμες, βολβώδη τόξα και βελτιστοποιημένα υποθαλάσσια προφίλ για μείωση της υδροδυναμικής αντίστασης. Αυτή η μείωση της αντίστασης μεταφράζεται σε μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες συσχετίζονται άμεσα με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η επίτευξη αυτών των υδροδυναμικών πλεονεκτημάτων απαιτεί μια επιστημονική προσέγγιση, που θα περιλαμβάνει αρχές της ναυτικής αρχιτεκτονικής και θα χρησιμοποιεί προσομοιώσεις υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD) και δοκιμές μοντέλων για να τελειοποιήσουν τα σχήματα του κύτους για ελάχιστη αντίσταση και βέλτιστα μοτίβα ροής.

- **Ελαφριά υλικά και δομική απόδοση (Lightweight Materials and Structural Efficiency):** Η ενσωμάτωση ελαφρών υλικών στην κατασκευή πλοίων προσφέρει σημαντικές δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η έρευνα σε αυτό το πεδίο τονίζει την κρίσιμη σημασία της επιλογής υλικού και της δομικής αποτελεσματικότητας. Ο χάλυβας υψηλής αντοχής, τα προηγμένα κράματα αλουμινίου και τα σύνθετα υλικά έχουν αναδειχθεί ως πολλά υποσχόμενες εναλλακτικές λύσεις στην παραδοσιακή κατασκευή χάλυβα. Αυτά τα υλικά, που χαρακτηρίζονται από ανώτερες αναλογίες αντοχής προς βάρος, συμβάλλουν στη μείωση του συνολικού βάρους ενός σκάφους, με αποτέλεσμα μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις για πρόωση. Οι προηγμένες αναλυτικές τεχνικές, όπως η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και η δομική βελτιστοποίηση, είναι καθοριστικές για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης των ελαφρών υλικών στη ναυπηγική βιομηχανία. Επιπλέον, οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες διερευνούν καινοτόμα ελαφρά δομικά στοιχεία και μεθοδολογίες για την επίτευξη στόχων βιωσιμότητας χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η ασφάλεια και η δομική ακεραιότητα.
- **Διαχείριση λίπανσης αέρα και οριακού στρώματος (Air Lubrication and Boundary Layer Management):** Οι αναδυόμενες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων λίπανσης αέρα, υπόσχονται ως καινοτόμες λύσεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις θαλάσσιες μεταφορές. Η επιστημονική βάση της λίπανσης αέρα βρίσκεται στη διαχείριση του οριακού στρώματος. Η εισαγωγή φυσαλίδων αέρα ή στρωμάτων αέρα κάτω από το κύτος του πλοίου δημιουργεί ένα «μαξιλάρι αέρα» που μετριάζει την τριβή μεταξύ του κύτους και του

νερού. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση μειώνει σημαντικά την υδροδυναμική αντίσταση, οδηγώντας σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και, κατά συνέπεια, σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η βελτιστοποίηση των συστημάτων λίπανσης αέρα και η απόδοσή τους υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας υπόκεινται σε εις βάθος μελέτη μέσω μοντελοποίησης υπολογιστικής δυναμικής ρευστών (CFD) και εμπειρικών ερευνών. Η έρευνα επεκτείνεται στην ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου που βασίζονται σε αισθητήρες που προσαρμόζουν δυναμικά τη ροή του αέρα για τη διατήρηση της βέλτιστης λίπανσης, αντιπροσωπεύοντας μια διεπιστημονική προσπάθεια που περιλαμβάνει τη δυναμική των ρευστών, τη θεωρία ελέγχου και την επιστήμη των υλικών.

- Τεχνολογίες επίστρωσης κύτους και μετριασμός βιοαπόρριψης (Hull Coating Technologies and Biofouling Mitigation): Η επιλογή των επικαλύψεων κύτους διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον ναυτιλιακό τομέα. Η βιοαπόρριψη, η συσσώρευση θαλάσσιων οργανισμών στο κύτος ενός σκάφους, αποτελεί σημαντική πρόκληση αυξάνοντας την αντίσταση και την κατανάλωση καυσίμου. Οι προηγμένες επικαλύψεις γάστρας, συμπεριλαμβανομένων των αντιρρυπαντικών και των επικαλύψεων χαμηλής τριβής, αποτελούν έναν τομέα εντατικής ακαδημαϊκής έρευνας και καινοτομίας. Οι αντιρρυπαντικές επικαλύψεις αποτρέπουν την εγκατάσταση θαλάσσιων οργανισμών μέσω της απελευθέρωσης βιοκτόνων ή φιλικών προς το περιβάλλον εναλλακτικών λύσεων. Οι επιστρώσεις χαμηλής τριβής αξιοποιούν εξειδικευμένα υλικά για να διατηρήσουν την ομαλότητα της γάστρας και να μειώσουν την ισχύ που απαιτείται για τη διατήρηση της ταχύτητας του πλοίου. Η διεπιστημονική έρευνα σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνει την επιστήμη των υλικών, τη χημεία, τη βιολογία και την περιβαλλοντική επιστήμη για την ανάπτυξη επικαλύψεων που αποτρέπουν αποτελεσματικά τη βιοαπόρριψη ελαχιστοποιώντας τις οικολογικές επιπτώσεις τους. Επιπλέον, το ακαδημαϊκό ενδιαφέρον στρέφεται στην αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης απόδοσης επίστρωσης, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ανθεκτικότητα, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα και η συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

### 3.2 Ανάλυση σχέσης μεγέθους πλοίου και μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Το μέγεθος του πλοίου είναι ένας κρίσιμος παράγοντας στις προσπάθειες της ναυτιλιακής βιομηχανίας να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG). Το μέγεθος ενός σκάφους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ενεργειακή του απόδοση, την ένταση των εκπομπών και τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτής της συσχέτισης είναι:

- Οικονομία κλίμακας και απόδοση εκπομπών: Τα μεγαλύτερα πλοία έχουν γενικά καλύτερη απόδοση καυσίμου ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου. Όπως εξηγείται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), «Οι οικονομίες κλίμακας επιτρέπουν στα μεγαλύτερα πλοία να μεταφέρουν περισσότερο φορτίο με σχετικά λιγότερα καύσιμα, με αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές ανά τόνο και χιλιόμετρο (IMO, 2017).
- Εμπορευματοκιβώτια και βέλτιστη χρήση του χώρου: Η ανάπτυξη της μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων οδήγησε σε μια τάση ναυπήγησης μεγαλύτερων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η αποτελεσματική χρήση του χώρου και η στοίβαξη εμπορευματοκιβωτίων σε ογκώδη πλοία μεγιστοποιεί τη χωρητικότητα φορτίου, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών ανά εμπορευματοκιβώτιο. Μια μελέτη του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ναυτιλίας (World Shipping Council) υπογραμμίζει πώς η διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων έχει συμβάλει στην αποτελεσματική μεταφορά και στις χαμηλότερες εκπομπές (World Shipping Council, 2020). Τα πλοία μεγάλων εμπορευματοκιβωτίων είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για διαδρομές μεγάλων αποστάσεων, όπου μπορούν να αυξήσουν την απόδοση. Ωστόσο, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα λιμάνια μπορούν να φιλοξενήσουν μέγα-πλοία (Mega-Container Ships) για να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες μείωσης των εκπομπών που αυτά προσφέρουν.
- Αποτελεσματικός χειρισμός και δρομολόγηση φορτίου: Η σωστή βελτιστοποίηση του μεγέθους του πλοίου συνδέεται άμεσα με την αποτελεσματική διαχείριση και δρομολόγηση φορτίου. Οι ναυτιλιακές εταιρείες χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο τεχνολογία και αναλύσεις δεδομένων για να διασφαλίσουν ότι τα πλοία φορτώνονται επαρκώς και ακολουθούν τις βέλτιστες διαδρομές. Αυτό ελαχιστοποιεί τις διαδρομές χωρίς πληρότητα φορτίου και μειώνει τις εκπομπές, όπως αναφέρεται σε έκθεση του Διεθνούς Φόρουμ Μεταφορών (International Transport Forum, 2019).



Μια ευέλικτη προσέγγιση στην επιλογή πλοίων, με βάση τις ειδικές ανάγκες των εμπορικών οδών, είναι απαραίτητη.

- Ευελιξία και προσαρμοστικότητα: Ενώ τα μεγαλύτερα σκάφη είναι γενικά πιο αποτελεσματικά, η ευελιξία είναι επίσης απαραίτητη. Τα μικρότερα πλοία μπορούν να είναι πιο κατάλληλα για συγκεκριμένες διαδρομές, επιτρέποντας την προσαρμοστικότητα ενόψει των μεταβαλλόμενων απαιτήσεων της αγοράς. Σε έκθεση του DNV GL4 αναφέρεται πώς το μέγεθος και ο σχεδιασμός του σκάφους πρέπει να προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες εμπορικές διαδρομές και τύπους φορτίου (DNV GL., 2023). Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτρέπει στις εταιρείες να εξισορροπούν αποτελεσματικά την αποδοτικότητα και τη μείωση των εκπομπών.
- Περιβαλλοντικοί Κανονισμοί και EEDI (Energy Efficiency Design Index): Έχουν εισαχθεί διεθνείς κανονισμοί για τον περιορισμό των εκπομπών από τα πλοία, συμπεριλαμβανομένου του Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης των Υφιστάμενων Πλοίων (Energy Efficiency Existing Ship Index, EEXI) σύμφωνα με το Παράρτημα VI του IMO MARPOL. Το μέγεθος του σκάφους έχει ρόλο στη συμμόρφωση με αυτούς τους κανονισμούς, καθώς τα μεγαλύτερα πλοία ενδέχεται να έχουν περισσότερο χώρο για τεχνολογίες μείωσης των εκπομπών. Ο IMO εξηγεί πώς οι απαιτήσεις EEXI συνδέονται με το μέγεθος και τον σχεδιασμό του σκάφους (IMO, 2021). Από την άλλη μεριά όμως μπορεί να έχουν πιο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Η κατασκευή μεγαλύτερων πλοίων απαιτεί περισσότερους πόρους, ενέργεια και υλικά. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής πλοίων, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης πρώτων υλών και της κατανάλωσης ενέργειας. Η αξιολόγηση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, από την κατασκευή έως τη λειτουργία, μπορεί να καθοδηγήσει αποφάσεις για το μέγεθος και το σχεδιασμό του πλοίου.
- Υβριδική και ηλεκτρική πρόωση: Οι αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως τα υβριδικά και ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, μετασχηματίζουν ταυτόχρονα το σχεδιασμό και το μέγεθος του πλοίου. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να κάνουν τα μικρότερα πλοία πιο αποτελεσματικά και φιλικά προς το περιβάλλον, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών. Σε μελέτη του Marine Pollution Bulletin αναφέρεται στη δυνατότητα των ηλεκτρικών ferry boats να μειώσουν τις εκπομπές GHG ενώ παράλληλα είναι συνήθως μικρότερα πλοία (Marine Pollution Bulletin, 2020).
- Παροπλισμός και απόσυρση: Η ηλικία και η αποτελεσματικότητα των πλοίων είναι βασικοί παράγοντες για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα

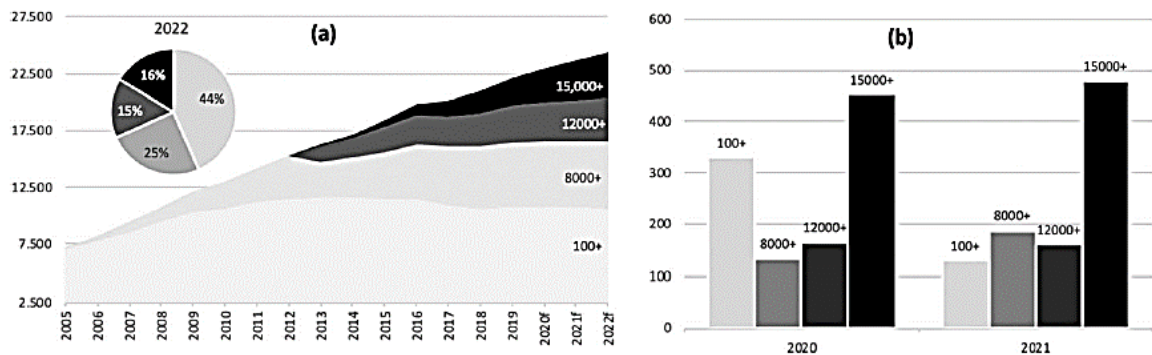
παλαιότερα, μικρότερα πλοία έχουν συχνά ξεπερασμένες τεχνολογίες και κινητήρες με χαμηλότερα επίπεδα απόδοσης. Η ενθάρρυνση του παροπλισμού και της διάλυσης αυτών των πλοίων και η αντικατάστασή τους με νεότερα, πιο αποδοτικά ενεργειακά, είναι ένα σημαντικό βήμα για τη μείωση των εκπομπών. Οι κυβερνήσεις και οι ρυθμιστικοί φορείς μπορούν να δώσουν οικονομικά κίνητρα στους πλοιοκτήτες ή να θεσπίσουν αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών για να αποσύρουν τα παλαιότερα πλοία τους. Αυτή η μετάβαση σε έναν νεότερο και πιο αποτελεσματικό στόλο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις των εκπομπών (Asariotis, R., & Benamara, H., 2016).

Συμπερασματικά, το μέγεθος του σκάφους είναι ένας πολύπλοκος παράγοντας στις προσπάθειες της ναυτιλιακής βιομηχανίας να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ενώ τα μεγαλύτερα πλοία μπορούν να είναι πιο αποδοτικά ως προς τις εκπομπές ανά μονάδα φορτίου, άλλα ζητήματα, όπως η βελτιστοποίηση του φορτίου, ο σχεδιασμός διαδρομής και οι αναδυόμενες τεχνολογίες πρόωσης, διαδραματίζουν επίσης κρίσιμους ρόλους. Η ναυτιλιακή βιομηχανία εξελίσσεται συνεχώς για να επιτύχει μια ισορροπία μεταξύ του μεγέθους του σκάφους, της αποτελεσματικότητας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

### 3.2.1 Κατάσταση πρακτικής στο σχεδιασμό μεγέθους πλοίου

Η τρέχουσα κατάσταση πρακτικής στη ναυτιλιακή βιομηχανία όσον αφορά το μέγεθος του σκάφους επηρεάζεται από την επιδίωξη οικονομιών κλίμακας, τις τεχνολογικές εξελίξεις και τις περιβαλλοντικές εκτιμήσεις. Αυτή η πολύπλευρη προσέγγιση καθοδηγείται τόσο από την οικονομική αποδοτικότητα όσο και από την ανάγκη για βιώσιμες πρακτικές.

- **Αύξηση οικονομιών κλίμακας και μεγέθους πλοίων:** Η επέκταση των μεγεθών των πλοίων, ειδικά στη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, είναι μια σημαντική τάση από το 2006. Αυτή η αύξηση οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις οικονομίες κλίμακας, όπου τα μεγαλύτερα πλοία προσφέρουν εξοικονόμηση κόστους και κέρδη αποδοτικότητας λόγω των μεγαλύτερων μεταφορικών ικανοτήτων τους. Ο κλάδος έχει σημειώσει μια αξιοσημείωτη ανάπτυξη στο μέγεθος των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, με τα εξαιρετικά μεγάλα πλοία εμπορευματοκιβωτίων (ULCS) και τα μεγάλα πλοία εμπορευματοκιβωτίων (VLCS) να αποκτούν πιο ευρεία παρουσία. Αυτά τα πλοία, που κυμαίνονται σε χωρητικότητα από 10.000 έως πάνω από 20.000 TEU, αναμένεται να συνεχίσουν να αυξάνονται σε μέγεθος, φτάνοντας πιθανώς έως και 30.000 TEU στο εγγύς μέλλον (Sánchez, et al., 2021) (Bernacki, 2021).



Εικόνα 27: Εξέλιξη της αύξησης μεγέθους πλοίων (σε TEU) 2005-2022 (a) και νέες παραγγελίες μεγάλων πλοίων (b) (Sánchez, και συν., 2021)

- Τεχνολογικές εξελίξεις και περιβαλλοντικά ζητήματα: Παράλληλα με την αύξηση του μεγέθους, υπάρχει μια ώθηση προς την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον και ενεργειακά αποδοτικών κινητήρων. Αυτό οφείλεται στην αυξανόμενη ζήτηση για κινητήρες με φυσικό αέριο και στην ανάγκη μείωσης των εκπομπών θείου. Επιπλέον, η ναυτιλιακή βιομηχανία εστιάζει επίσης στην ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών που σχετίζονται με πλοία και λιμενικές εγκαταστάσεις για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών ανησυχιών. Η ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση της βιομηχανίας με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης, ιδίως όσον αφορά τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών ανά εμπορευματοκιβώτιο (Sánchez, et al., 2021).
- Συνεργασία και στρατηγικές βάσει δεδομένων: Ο κλάδος υιοθετεί ολοένα και περισσότερο συνεργατικές και βασισμένες σε δεδομένα στρατηγικές για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας. Αξιοποιώντας ενοποιημένες πλατφόρμες δεδομένων, οι ενδιαφερόμενοι σε όλη την θαλάσσια αλυσίδα εφοδιασμού μπορούν να έχουν πρόσβαση σε κοινά σημεία δεδομένων, ενισχύοντας τη συνεργασία του κλάδου και επιταχύνοντας τις περιβαλλοντικές προσπάθειες. Αυτή η προσέγγιση προωθεί πιο αποτελεσματικές και κερδοφόρες λειτουργίες ενώ ταυτόχρονα προωθεί περιβαλλοντικούς στόχους (Sánchez, et al., 2021).
- Δυναμική της αγοράς και πρότυπα παγκόσμιου εμπορίου: Η δυναμική της αγοράς, επηρεασμένη από τα παγκόσμια εμπορικά πρότυπα και τις περιφερειακές εξελίξεις, διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην τάση προς μεγαλύτερα μεγέθη πλοίων. Για παράδειγμα, η κυριαρχία της Ασίας-Ειρηνικού στην ναυπηγική αγορά, που

καθοδηγείται από βασικούς παράγοντες στη Νότια Κορέα, την Ιαπωνία και την Κίνα, υπογραμμίζει την επιρροή της περιοχής στις παγκόσμιες τάσεις της ναυτιλίας. Επιπλέον, η εστίαση της Ευρώπης στην καινοτομία και την παροχή καθαρότερων, ασφαλέστερων πλοίων διαμορφώνει περαιτέρω την προσέγγιση του κλάδου όσον αφορά το μέγεθος και τη βιωσιμότητα των πλοίων (Fortune Business Insights, 2021).

Συνοπτικά, η προσέγγιση της ναυτιλιακής βιομηχανίας στο μέγεθος του σκάφους διαμορφώνεται από την επιδίωξη οικονομικών κλίμακας, τεχνολογικές καινοτομίες, περιβαλλοντική βιωσιμότητα και δυναμική της παγκόσμιας αγοράς. Αυτοί οι παράγοντες συμβάλλουν συλλογικά στις προσπάθειες του κλάδου να εξισορροπήσει τη λειτουργική απόδοση με την περιβαλλοντική ευθύνη.

### 3.2.2 Τεχνολογίες βελτιστοποίησης μεγέθους πλοίων

Οι τεχνολογίες αιχμής βρίσκονται στην πρώτη γραμμή της διαμόρφωσης της κατάστασης πρακτικής στη βελτιστοποίηση μεγέθους πλοίων. Παρακάτω συνοψίζονται ορισμένες σημαντικές τεχνολογίες που αφορούν το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του μεγέθους πλοίων.

Digital Twin Technology: Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ουσιαστικά ένα εικονικό μοντέλο που αντανακλά με ακρίβεια ένα φυσικό αντικείμενο — σε αυτή την περίπτωση, ένα πλοίο. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη λεπτομερή προσομοίωση και ανάλυση της απόδοσης ενός πλοίου κάτω από διάφορα επιχειρησιακά σενάρια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση ολόκληρου του πλοίου, από συστήματα πρόωσης και ισχύος μέχρι τη σχεδίαση του κύτους και τις δυνατότητες ελιγμών. Για παράδειγμα, μια εργασία από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT) έδειξε τη χρήση ενός ψηφιακού δίδυμου για ένα ηλεκτρικό πλοίο, επιδεικνύοντας την εφαρμογή του στη μοντελοποίηση και την προσομοίωση διαφόρων συμπεριφορών του πλοίου, όπως ελιγμούς και διατήρηση της ασφάλειας πλεύσης σε διαφορετικές συνθήκες κατάστασης κυματισμού (Gilligan, 2019).

Η κύρια όμως εφαρμογή της ψηφιακής διπλής τεχνολογίας στο σχεδιασμό πλοίων είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης του πλοίου και οι μειωμένες εκπομπές. Αυτή η βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί με την προσομοίωση διαφορετικών σχεδίων, υλικών και επιχειρησιακών στρατηγικών για τον προσδιορισμό των πιο αποτελεσματικών επιλογών. Η Siemens, για παράδειγμα, προσφέρει ολοκληρωμένες λύσεις λογισμικού σχεδιασμού για τη ναυπηγική που επιτρέπουν τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, δομικές και δυναμικές αναλύσεις ρευστών και βελτιστοποίηση απόδοσης (Hayden, 2023).

Έργα όπως το Digital Twin for Green Shipping (DT4GS) απεικονίζουν τη συνεργατική φύση αυτής της τεχνολογίας. Το DT4GS συγκεντρώνει διάφορους ενδιαφερόμενους από τον κλάδο των θαλάσσιων μεταφορών, συμπεριλαμβανομένων ναυτιλιακών εταιρειών, γραφείων σχεδιασμού, ναυπηγείων και υπευθύνων χάραξης πολιτικής, για να εναρμονίσει τις προσπάθειες σχεδιασμού νέων πλοίων. Το έργο εστιάζει στην αύξηση της εμπιστοσύνης στις τεχνικές και οικονομικές προβλέψεις σχετικά με τα πράσινα καύσιμα και την τεχνολογία (Katsoulakos, 2022).

Συνοπτικά, η ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία και η προσομοίωση είναι ισχυρά εργαλεία στη ναυτιλιακή βιομηχανία, επιτρέποντας πιο αποτελεσματικούς σχεδιασμούς και λειτουργίες πλοίων που συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Big Data Analytics: Ισχυρές πλατφόρμες ανάλυσης μεγάλων δεδομένων επεξεργάζονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων που δημιουργούνται από σκάφη, διευκολύνοντας τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών τους, συμπεριλαμβανομένων εκτιμήσεων που σχετίζονται με το μέγεθος. Η ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο εντοπίζει ευκαιρίες για μείωση των εκπομπών. Η σχέση μεταξύ του μεγέθους του πλοίου και της χρήσης διαφόρων τεχνολογιών μεγάλων δεδομένων για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μπορεί να γίνει κατανοητή ως εξής (Wang, et al., 2023):

- Μοντέλα πρόβλεψης χρονοσειρών (Time-Series Forecasting Models): Παραδοσιακά μοντέλα όπως το ARIMA έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για προβλέψεις, αλλά ενδέχεται να μην αποτυπώνουν αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα που σχετίζεται με το μέγεθος του πλοίου και τον αντίκτυπό του στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Τα μεγαλύτερα πλοία ενδέχεται να ακολουθούν διαφορετικά λειτουργικά πρότυπα, επηρεάζοντας τις εκπομπές με τρόπους που τα γραμμικά μοντέλα ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως. Η περίπλοκη σχέση μεταξύ του μεγέθους του πλοίου, της διαδρομής, της ταχύτητας και των εκπομπών απαιτεί πιο εξελιγμένα μοντέλα.
- Μοντέλα μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης (Machine Learning and Deep Learning Models): Η εφαρμογή μοντέλων μηχανικής μάθησης, όπως τα SVM και RF, και τεχνικών βαθιάς μάθησης, όπως τα CNN και τα RNN, προσφέρουν μια πιο λεπτή κατανόηση της επίδρασης του μεγέθους του πλοίου στις εκπομπές GHG. Αυτά τα μοντέλα μπορούν να αναλύσουν πολύπλοκα σύνολα δεδομένων για να αποκαλύψουν μοτίβα και σχέσεις που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με το μέγεθος του πλοίου. Για παράδειγμα, μπορεί να αποκαλύψουν πώς η απόδοση καυσίμου των

μεγαλύτερων σκαφών ποικίλλει υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας ή πώς το μέγεθός τους επηρεάζει τις εκπομπές κατά τη διάρκεια των λιμενικών λειτουργιών.

- Εκτίμηση απογραφής εκπομπών GHG χωροχρονικά (Spatiotemporal GHG Emission Inventory Estimation): Η χρήση προηγμένων μοντέλων για την εκτίμηση και την πρόβλεψη των εκπομπών GHG μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το μέγεθος του πλοίου επηρεάζει αυτές τις εκπομπές με την πάροδο του χρόνου και του χώρου. Τα μεγαλύτερα πλοία μπορεί να εκπέμπουν περισσότερα GHG συνολικά, αλλά θα μπορούσαν να είναι πιο αποτελεσματικά ανά μονάδα φορτίου ή απόσταση. Τα χωροχρονικά μοντέλα μπορούν να αναλύσουν δεδομένα AIS για να συσχετίσουν το μέγεθος του πλοίου με τις εκπομπές σε διαφορετικές διαδρομές και συνθήκες λειτουργίας.
- Ανάλυση εκπομπών άνθρακα βάσει μεγάλων δεδομένων: Χρησιμοποιώντας μεγάλα δεδομένα, όπως δεδομένα AIS, σε συνδυασμό με παραμέτρους εκπομπής ρύπων, μπορεί να αναλυθούν τα ειδικά χαρακτηριστικά εκπομπών διαφορετικών μεγεθών πλοίων. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να παρέχει πληροφορίες για το πώς το μέγεθος επηρεάζει τις εκπομπές από διάφορους κινητήρες και λειτουργίες πλοίων. Για παράδειγμα, τα μεγαλύτερα πλοία μπορεί να έχουν υψηλότερες εκπομπές κοντά σε λιμάνια λόγω μεγαλύτερου χρόνου ελλιμενισμού, όπως τονίζεται σε ορισμένες μελέτες (Xie, et al., 2023).

Στην ουσία, αυτές οι τεχνολογίες μεγάλων δεδομένων επιτρέπουν μια πιο αναλυτική και ολοκληρωμένη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το μέγεθος του πλοίου επηρεάζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στις θαλάσσιες μεταφορές.

Καινοτομίες κύτους και αεροδυναμικής: Η συνεχής έρευνα για τα σχέδια κύτους του πλοίου, τα συστήματα λίπανσης αέρα κ.α. μειώνει την υδροδυναμική αντίσταση, ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση. Οι καινοτομίες σε αυτόν τον τομέα επηρεάζουν το μέγεθος του σκάφους βελτιώνοντας την απόδοση, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων.

### 3.2.3 Προκλήσεις σχετικές με το μέγεθος πλοίου ως παράγοντα μείωσης των GHG

- Εξισορρόπηση μεγέθους και αποτελεσματικότητας

Η επίτευξη της λεπτής ισορροπίας μεταξύ του μεγέθους του σκάφους και της ενεργειακής απόδοσης είναι μια καίρια πρόκληση στην προσπάθεια του ναυτιλιακού τομέα να μειώσει

τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Τα μεγαλύτερα πλοία, όπως τα εξαιρετικά μεγάλα πλοία εμπορευματοκιβωτίων (ULCV), συχνά επιδεικνύουν ανώτερη ενεργειακή απόδοση ανά μονάδα φορτίου, κυρίως λόγω των οικονομιών κλίμακας. Ωστόσο, αυτό το κέρδος απόδοσης μπορεί να αντισταθμιστεί από το σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα που σχετίζεται με την κατασκευή και λειτουργία τέτοιων ογκωδών σκαφών (Sánchez, et al., 2021).

Η βελτίωση από αυτή την άποψη απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία οι αξιολογήσεις του κύκλου ζωής (LCA) καθίστανται αναπόσπαστες. Αυτές οι αξιολογήσεις προσφέρουν μια ολοκληρωμένη άποψη, που περιλαμβάνει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παραγωγής σκαφών και τη λειτουργική απόδοση. Οι πλοιοκτήτες, οι ρυθμιστικές αρχές και οι ενδιαφερόμενοι πρέπει να αξιολογούν από κοινού τις περιβαλλοντικές ανταλλαγές που σχετίζονται με τις αποφάσεις για το μέγεθος των σκαφών. Αυτό θα επέτρεπε μια πιο ενημερωμένη επιλογή μεγεθών σκαφών που βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση, ενώ μετριάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

- Λιμενική Υποδομή και Προσβασιμότητα

Η προσαρμογή της λιμενικής υποδομής για την υποδοχή μεγαλύτερων σκαφών είναι μια άλλη κρίσιμη πρόκληση. Τα λιμάνια συχνά προσπαθούν να συμβαδίσουν με το αυξανόμενο μέγεθος των πλοίων. Η ανεπαρκής χωρητικότητα ελλιμενισμού και ο ανεπαρκής εξοπλισμός που είναι κατάλληλος για πλοία μεγάλων εμπορευματοκιβωτίων εμποδίζουν την αποτελεσματική διακίνηση φορτίου, επιδεινώνοντας τη συμφόρηση και τις καθυστερήσεις. Η βελτίωση σε αυτόν τον τομέα απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε λιμενικές υποδομές και τεχνολογικές αναβαθμίσεις. Οι κυβερνήσεις, οι λιμενικές αρχές και οι ναυτιλιακές εταιρείες πρέπει να συνεργαστούν για να επισπεύσουν αυτές τις εξελίξεις. Οι συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα μπορούν να αποδειχθούν καθοριστικές για τη χρηματοδότηση αυτών των ουσιαστικών βελτιώσεων. Τέτοιες επενδύσεις είναι ζωτικής σημασίας όχι μόνο για τη φιλοξενία μεγαλύτερων πλοίων αλλά και για τη βελτίωση της συνολικής αποτελεσματικότητας των λιμενικών λειτουργιών και τη μείωση των εκπομπών που σχετίζονται με τους χρόνους αναμονής και τη συμφόρηση (Bernacki, 2021).

- Τεχνολογικές εξελίξεις

Παρά τις δυνατότητες για σημαντικές μειώσεις των εκπομπών, η αργή υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών στη ναυτιλιακή βιομηχανία παραμένει μια ουσιαστική πρόκληση (Garrido, et al., 2020). Τα πράσινα συστήματα πρόωσης, όπως οι κινητήρες LNG, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και οι καινοτόμες υβριδικές λύσεις, προσφέρουν την υπόσχεση για πιο πράσινες και πιο ενεργειακά αποδοτικές λειτουργίες πλοίων. Ωστόσο, το κόστος και η

σκοπιμότητα της εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών μπορεί να είναι απαγορευτικά για πολλούς πλοιοκτήτες.

Η βελτίωση σε αυτό το πλαίσιο απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση. Η ενθάρρυνση ουσιαστικών επενδύσεων στην έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών πράσινης πρόωσης είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι κυβερνήσεις και οι διεθνείς φορείς θα πρέπει να εξετάσουν το ενδεχόμενο να προσφέρουν οικονομικά κίνητρα, φορολογικά οφέλη και επιδοτήσεις για να παρακινήσουν τους πλοιοκτήτες να υιοθετήσουν καθαρότερες τεχνολογίες. Η συνεργασία μεταξύ των κυβερνήσεων, του ακαδημαϊκού κόσμου και του ιδιωτικού τομέα θα πρέπει να προωθηθεί ενεργά για να επιταχυνθεί η ενσωμάτωση καινοτόμων λύσεων πρόωσης στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

- Βελτιστοποίηση διαδρομής και πρότυπα συναλλαγών

Η ναυτιλιακή βιομηχανία λειτουργεί σε ένα δυναμικό παγκόσμιο εμπορικό τοπίο, που χαρακτηρίζεται από εξελισσόμενα εμπορικά πρότυπα και διαδρομές (Bernacki, 2021). Για να ανταποκριθεί αποτελεσματικά σε αυτές τις αλλαγές και να βελτιστοποιήσει το μέγεθος του πλοίου για μείωση των εκπομπών, ο κλάδος αντιμετωπίζει την πρόκληση της πρόβλεψης και της προσαρμογής στη δυναμική του αναδυόμενου εμπορίου.

Η πρόοδος σε αυτόν τον τομέα εξαρτάται από τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων. Η βελτιωμένη ανάλυση δεδομένων, σε συνδυασμό με την προγνωστική μοντελοποίηση για την πρόβλεψη εμπορικών οδών, δίνει τη δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους να προβλέπουν αλλαγές στα εμπορικά πρότυπα και τον όγκο φορτίου. Αξιοποιώντας μεγάλα δεδομένα και πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, οι ναυτιλιακές εταιρείες και οι λιμενικές αρχές μπορούν να βελτιστοποιήσουν τα μεγέθη των πλοίων, μειώνοντας έτσι τις περιττές εκπομπές που σχετίζονται με τη μη βέλτιστη δρομολόγηση και την ανεκματάλευτη χωρητικότητα. Επιπλέον, η προώθηση της συνεργασίας μεταξύ των συμμετεχόντων στην εφοδιαστική αλυσίδα είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη ευέλικτων αντιδράσεων στις μεταβαλλόμενες εμπορικές δυναμικές.

- Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Η διεξαγωγή ολοκληρωμένων εκτιμήσεων περιβαλλοντικών επιπτώσεων για διαφορετικά μεγέθη πλοίων και διαδρομές είναι μια απαιτητική εργασία που απαιτεί πόρους και χρόνο. Οι πολυπλοκότητες που σχετίζονται με την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αποφάσεων για το μέγεθος του πλοίου μπορεί να εμποδίσουν την πρόοδο στις προσπάθειες μείωσης των εκπομπών (Garrido, et al., 2020).



Η βελτίωση σε αυτόν τον τομέα συνεπάγεται την ανάπτυξη τυποποιημένων εργαλείων και βελτιωμένων διαδικασιών αξιολόγησης. Οι συνεργατικές προσπάθειες εντός του κλάδου μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία καθολικά αποδεκτών μεθοδολογιών εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μειώνοντας την επιβάρυνση των πόρων και του χρόνου. Η εφαρμογή αυτών των τυποποιημένων εργαλείων θα επιτρέψει στα ενδιαφερόμενα μέρη να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τα μεγέθη των πλοίων, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις συνολικά.

#### 3.2.4 Εκτίμηση TRL σε σχέση με τις τεχνολογίες μεγέθους πλοίου

Η εκτίμηση του Επιπέδου Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL) για τεχνολογίες μεγάλων δεδομένων στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ειδικά για εφαρμογές που σχετίζονται με το μέγεθος του πλοίου και τη μείωση των εκπομπών GHG αποτελεί μία δύσκολη διαδικασία καθώς συγκεκριμένες τιμές TRL δεν περιγράφονται συνήθως λεπτομερώς στις αναφορές. Ωστόσο, με βάση την τρέχουσα κατάσταση της έρευνας και των εφαρμογών, επιχειρείται παρακάτω να γίνει μια λογική εκτίμηση (Ilias, και συν., 2023):

**Digital Twin Technology:** Η ψηφιακή διπλή τεχνολογία σε ναυτιλιακές εφαρμογές φαίνεται να βρίσκεται σε υψηλό TRL, πιθανότατα μεταξύ TRL 6 και TRL 8. Αυτή η αξιολόγηση βασίζεται στις αποδεδειγμένες ικανότητές της σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα, όπως υποδεικνύεται από μελέτη για ηλεκτρικό πλοίο (Gilligan, 2019). Η τεχνολογία έχει δοκιμαστεί σε σχετικά περιβάλλοντα και έχει αποδείξει τις επιχειρησιακές της ικανότητες.

**Εφαρμογές στον σχεδιασμό πλοίου και τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου:** Η χρήση ολοκληρωμένων λύσεων λογισμικού σχεδιασμού για τη ναυπηγική βιομηχανία, όπως παρέχονται από εταιρείες όπως η Siemens, υποδηλώνει ότι αυτές οι εφαρμογές βρίσκονται επίσης σε υψηλό TRL, πιθανώς TRL 7 ή TRL 8. Αυτό οφείλεται στις προηγμένες δυνατότητές τους στην υποστήριξη ολόκληρης της ναυπηγικής διαδικασίας, από τον αρχικό σχεδιασμό έως την παραγωγή, με εφαρμογές που ήδη υπάρχουν στον πραγματικό κόσμο. Αυτές οι λύσεις λογισμικού χρησιμοποιούνται ενεργά στον κλάδο, δείχνοντας ότι έχουν αποδειχθεί με επιτυχία σε λειτουργικά περιβάλλοντα.

**Έργα συνεργασίας και καινοτομίας όπως το DT4GS:** Έργα όπως το Digital Twin for Green Shipping (DT4GS) υποδεικνύουν ότι η τεχνολογία δεν είναι μόνο προηγμένη αλλά υιοθετείται και ενσωματώνεται όλο και περισσότερο σε ευρύτερες βιομηχανικές πρωτοβουλίες. Αυτό υποδηλώνει ένα TRL περίπου 7 έως 8, όπου η τεχνολογία χρησιμοποιείται σε πραγματικές

λειτουργίες και συμβάλλει στις προσπάθειες σε ολόκληρη τη βιομηχανία για βιωσιμότητα και αποτελεσματικότητα.

Συλλογή και καθαρισμός μεγάλων δεδομένων: Τεχνολογίες όπως το Apache Kafka για τη συλλογή δεδομένων και τα κατακευματισμένα συστήματα αρχείων Hadoop (HDFS) για την αποθήκευση δεδομένων χρησιμοποιούνται ευρέως στον ναυτιλιακό τομέα, ειδικά για το χειρισμό συνόλων δεδομένων AIS. Αυτές οι τεχνολογίες είναι πιθανώς σε υψηλό TRL, περίπου TRL 7-8, καθώς είναι καλά εδραιωμένες και ενσωματωμένες σε λειτουργικά συστήματα.

Προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης ML και DL: Η εφαρμογή των μεθόδων Machine Learning (ML) και Deep Learning (DL) στον ναυτιλιακό τομέα, ιδιαίτερα για το χειρισμό χωροχρονικών δεδομένων, προχωρά με ταχείς ρυθμούς. Ωστόσο, η συγκεκριμένη εφαρμογή για τη βελτιστοποίηση του μεγέθους των σκαφών και την πρόβλεψη εκπομπών GHG ενδέχεται να βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης, υποδηλώνοντας TRL στην περιοχή TRL 4-6. Αυτές οι τεχνολογίες βρίσκονται υπό ενεργό έρευνα και ανάπτυξη, με ορισμένες πρακτικές εφαρμογές να εμφανίζονται.

Μοντελοποίηση προσομοίωσης και τεχνητή νοημοσύνη για ναυτιλιακές εφαρμογές: Τεχνικές συν-προσομοίωσης και προσεγγίσεις με γνώμονα την τεχνητή νοημοσύνη για το σχεδιασμό πλοίων και τη διαχείριση της κυκλοφορίας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο. Αυτές οι τεχνολογίες είναι πιθανώς μεταξύ TRL 5-7, υποδεικνύοντας ότι έχουν επικυρωθεί σε σχετικά περιβάλλοντα, αλλά ενδέχεται να μην έχουν ακόμη υιοθετηθεί ευρέως σε ολόκληρο τον κλάδο.

Πίνακας 3: Τεχνολογίες μεγέθους πλοίου και εκτίμηση κατάστασης τεχνολογικής ωριμότητας

Τεχνολογία	Περιγραφή	Εκτίμηση TRL	Αιτιολόγηση
<b>Digital Twin Technology</b>	Εικονικά μοντέλα που αντιστοιχούν σε φυσικά πλοία για προσομοίωση και ανάλυση απόδοσης.	6-8	Προηγμένες δυνατότητες προσομοίωσης και ανάλυσης, που αποδεικνύονται σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου.
<b>Simulation Technology</b>	Μοντελοποίηση και προσομοίωση της απόδοσης του πλοίου, βοηθώντας στο σχεδιασμό και τη επιχειρησιακή στρατηγική.	7-8	Χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, υποδεικνύοντας τη χρήση και την ολοκλήρωση του λειτουργικού περιβάλλοντος.
<b>Big Data Collection and Cleansing (e.g., Apache Kafka, HDFS)</b>	Χειρισμός μεγάλων θαλάσσιων συνόλων δεδομένων όπως το AIS, εστιάζοντας στη διαχείριση δεδομένων.	7-8	Ενσωματωμένο σε λειτουργικά συστήματα για αποτελεσματική διαχείριση δεδομένων σε ναυτιλιακές εφαρμογές.
<b>Advanced ML and DL Techniques</b>	Μέθοδοι Machine Learning και Deep Learning για την ανάλυση χωροχρονικών θαλάσσιων δεδομένων.	4-6	Υπό ενεργό έρευνα και ανάπτυξη με ορισμένες αναδυόμενες πρακτικές εφαρμογές.
<b>Co-simulation and AI in Maritime Applications</b>	Προσεγγίσεις με γνώμονα την τεχνητή νοημοσύνη για το σχεδιασμό πλοίων, τη διαχείριση της κυκλοφορίας και την ανάλυση σεναρίων.	5-7	Επικυρώθηκε σε σχετικά περιβάλλοντα, αλλά δεν έχει ακόμη πλήρως υιοθετηθεί σε ολόκληρο τον κλάδο.
<b>Digital Twin for Green Shipping (DT4GS)</b>	Έργο για την εναρμόνιση των προσπαθειών πράσινης ναυτιλίας και τη διευκόλυνση των σχεδίων μετάβασης στις μηδενικές εκπομπές.	4-6	Μέρος της ενεργούς έρευνας και ανάπτυξης, με επίκεντρο τις τεχνικές και οικονομικές προβλέψεις για την πράσινη ναυτιλία.

### 3.3 Αέρια Λίπανση (Air Lubrication)

#### 3.3.1 Κατάσταση πρακτικής

Οι τεχνολογίες λίπανσης αέρα έχουν κερδίσει σημαντική θέση στον ναυτιλιακό τομέα ως μέρος των προσπαθειών για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG). Αυτές οι τεχνολογίες στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της αντίστασης μεταξύ του κύτους του πλοίου και του περιβάλλοντος νερού, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση καυσίμου και συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ακολουθεί η κατάσταση της πρακτικής για τη λίπανση του αέρα στον ναυτιλιακό τομέα ως μέσο για την καταπολέμηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου:

- **Μετασκευή υφιστάμενων σκαφών:** Πολλές εταιρείες εξοπλίζουν εκ των υστέρων τα υπάρχοντα πλοία τους με συστήματα λίπανσης αέρα. Αυτές οι λύσεις μετασκευής, που περιλαμβάνουν συστήματα φυσαλίδων αέρα και συστήματα έγχυσης μικροφυσαλίδων, εφαρμόζονται σε διάφορους τύπους πλοίων, όπως πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και κρουαζιερόπλοια. Η μετασκευή επιτρέπει στα παλαιότερα σκάφη να επωφελούνται από τη βελτιωμένη απόδοση καυσίμου και τις μειωμένες εκπομπές.
- **Ενσωμάτωση σε νέα σχέδια πλοίων:** Οι τεχνολογίες λίπανσης αέρα ενσωματώνονται όλο και περισσότερο στη φάση σχεδιασμού νέων σκαφών. Οι ναυπηγοί ενσωματώνουν αυτά τα συστήματα στην αρχική κατασκευή των πλοίων, διασφαλίζοντας ότι είναι βελτιστοποιημένα για μέγιστη απόδοση από την αρχή. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την ανάγκη για δαπανηρές μετασκευές και διασφαλίζει ότι τα νέα σκάφη είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον από την πρώτη μέρα λειτουργίας τους.
- **Στόχοι μείωσης εκπομπών:** Καθώς οι παγκόσμιοι κανονισμοί και οι πρωτοβουλίες του κλάδου στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία, η λίπανση του αέρα θεωρείται ως ένα πρακτικό μέσο για την επίτευξη αυτών των στόχων. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για μείωση της έντασης του άνθρακα κατά 40% έως το 2030 και 70% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008. Οι τεχνολογίες λίπανσης αέρα αναγνωρίζονται ως μέρος της λύσης για την επίτευξη αυτών των στόχων.
- **Αποδεδειγμένη εξοικονόμηση καυσίμου:** Πολυάριθμες μελέτες περιπτώσεων και εφαρμογές πραγματικού κόσμου έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της λίπανσης αέρα στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Ανάλογα με την τεχνολογία

που χρησιμοποιείται και τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου, αυτά τα συστήματα έχει αποδειχθεί ότι επιτυγχάνουν εξοικονόμηση καυσίμου έως και 10% ή περισσότερο. Αυτό όχι μόνο μειώνει το λειτουργικό κόστος αλλά και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά ταξίδι.

- Έρευνα και Ανάπτυξη: Οι συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης επικεντρώνονται στη βελτίωση των υφιστάμενων τεχνολογιών λίπανσης αέρα και στην εξερεύνηση καινοτόμων προσεγγίσεων. Στόχος εκτεταμένων ερευνών είναι η βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η διασφάλιση αξιόπιστης απόδοσης υπό διάφορες συνθήκες.
- Ρυθμιστική υποστήριξη: Οι κυβερνήσεις και οι ρυθμιστικοί φορείς της ναυτιλίας υποστηρίζουν όλο και περισσότερο τις τεχνολογίες λίπανσης αέρα ως μέρος των στρατηγικών τους για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Εισάγονται οικονομικά κίνητρα, επιδοτήσεις και ευνοϊκοί κανονισμοί για την ενθάρρυνση της υιοθέτησης αυτών των τεχνολογιών.
- Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων: Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συστημάτων λίπανσης αέρα είναι αντικείμενο συνεχούς έρευνας και αξιολόγησης. Ενώ αυτές οι τεχνολογίες μειώνουν τις εκπομπές κατά τη λειτουργία, η παραγωγή, η εγκατάσταση και το τέλος του κύκλου ζωής τους εξετάζονται για να διασφαλιστεί μια ολιστική εικόνα των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Συνοπτικά, οι τεχνολογίες λίπανσης αέρα γίνονται αναπόσπαστο μέρος της στρατηγικής της ναυτιλιακής βιομηχανίας για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η κατάσταση της πρακτικής περιλαμβάνει τον εκσυγχρονισμό των υφιστάμενων σκαφών, την ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων σε νέα σχέδια πλοίων, την επίδειξη εξοικονόμησης καυσίμων, τη συνεχή έρευνα και ανάπτυξη, τη ρυθμιστική υποστήριξη, την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη συνεργασία της βιομηχανίας. Καθώς ο ναυτιλιακός τομέας συνεχίζει να δίνει προτεραιότητα στη βιωσιμότητα, η λίπανση του αέρα θα διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο ενός πράσινου μέλλοντος για τις θαλάσσιες μεταφορές.

### 3.3.2 Προκλήσεις εφαρμογής αέριας λίπανσης στη ναυτιλία

#### Βελτίωση τεχνολογίας

- Συνεχής έρευνα και ανάπτυξη: Η βελτίωση των τεχνολογιών λίπανσης αέρα εξαρτάται από τις συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης(R&D). Τα ερευνητικά κέντρα, οι πάροχοι τεχνολογίας και η ναυτιλιακή βιομηχανία πρέπει να συνεργαστούν για τη διεξαγωγή ολοκληρωμένων μελετών και πειραμάτων. Αυτές οι προσπάθειες θα πρέπει να διερευνήσουν διάφορες πτυχές, όπως τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της δημιουργίας φυσαλίδων αέρα, τη βελτίωση του σχεδιασμού των συστημάτων έγχυσης μικροφυσαλίδων και τη προώθηση αλγορίθμων ελέγχου στα υλικά. Η ανάπτυξη προηγμένων υλικών που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και τη ρύπανση είναι ζωτικής σημασίας. Θα πρέπει επίσης να διευκολύνουν την αποτελεσματική απελευθέρωση και τον έλεγχο των φυσαλίδων αέρα ή των μικροφυσαλίδων. Η έρευνα σε νέα υλικά μπορεί να οδηγήσει σε πιο ανθεκτικά και οικονομικά συστήματα λίπανσης αέρα.
- Ενεργειακή απόδοση: Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων λίπανσης αέρα είναι μια κρίσιμη πτυχή της βελτίωσης. Περισσότεροι ενεργειακά αποδοτικοί συμπιεστές, αντλίες και συστήματα ελέγχου μπορούν να συμβάλουν στη συνολική απόδοση του συστήματος. Οι καινοτομίες στους μηχανισμούς ανάκτησης ενέργειας μπορούν επίσης να συμβάλουν στην ελαχιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος αυτών των τεχνολογιών.
- Ενίσχυση αξιοπιστίας: Η διασφάλιση της αξιοπιστίας των συστημάτων λίπανσης αέρα είναι αναμφισβήτητα απαραίτητη. Η έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στη βελτίωση της ευρωστίας του συστήματος, της ανοχής σε σφάλματα και των δυνατοτήτων πρόβλεψης συντήρησης. Η παρακολούθηση και η διάγνωση σε πραγματικό χρόνο μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό προβλημάτων προτού οδηγήσουν σε βλάβες του συστήματος.
- Ενοποίηση συστήματος: Η απρόσκοπτη ενσωμάτωση συστημάτων λίπανσης αέρα με άλλα συστήματα πλοίων, όπως η πρόωση και η πλοήγηση, είναι μια διαρκής πρόκληση. Η ανάπτυξη ολοκληρωμένων λύσεων που βελτιστοποιούν την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των συστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη συνολική απόδοση και εξοικονόμηση καυσίμου.
- Προσαρμοστικοί αλγόριθμοι ελέγχου: Η ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου που μπορούν να προσαρμοστούν σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες, ταχύτητες

σκάφους και τρόπους λειτουργίας είναι ζωτικής σημασίας. Αυτοί οι αλγόριθμοι θα πρέπει να βελτιστοποιούν συνεχώς την απελευθέρωση φυσαλίδων αέρα ή μικροφυσαλίδων για να διατηρήσουν τη βέλτιστη υδροδυναμική απόδοση.

- Κλίμακα για διαφορετικούς τύπους σκαφών: Οι τεχνολογίες λίπανσης αέρα πρέπει να είναι προσαρμόσιμες σε πλοία διαφορετικών μεγεθών και τύπων. Η έρευνα θα πρέπει να εξετάσει την επεκτασιμότητα αυτών των συστημάτων για να διασφαλίσει ότι είναι αποτελεσματικά για μικρά παράκτια σκάφη καθώς και για μεγάλα ποντοπόρα πλοία.
- Μετριασμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων: Η μείωση τυχόν πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με συστήματα λίπανσης αέρα αποτελεί σημαντική πρόκληση στην ανάπτυξη των συστημάτων. Η έρευνα γύρω από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα πρέπει να περιλαμβάνει την αξιολόγηση του αντίκτυπου της απελευθέρωσης φυσαλίδων στα θαλάσσια οικοσυστήματα και την ανάπτυξη στρατηγικών για την ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων, όπως οι εκπομπές μικροπλαστικών.
- Μείωση κόστους: Οι προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν επίσης και να διερευνήσουν τρόπους μείωσης του κόστους κατασκευής και εγκατάστασης συστημάτων λίπανσης αέρα. Οι οικονομικά αποδοτικές λύσεις μπορούν να καταστήσουν αυτές τις τεχνολογίες πιο προσιτές σε ένα ευρύτερο φάσμα πλοιοκτητών.

#### Συμβατότητα αναλόγως των συνθηκών

- Διαφορετικά περιβάλλοντα λειτουργίας: Μία από τις κεντρικές προκλήσεις της εφαρμογής τεχνολογιών λίπανσης αέρα είναι ότι τα πλοία λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους πλοίων, μεγέθη, ταχύτητες, θαλάσσιες καταστάσεις, θερμοκρασίες νερού και διαδρομές. Η διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης των συστημάτων λίπανσης αέρα σε αυτό το φάσμα αποτελεί πρόκληση λόγω της πολυπλοκότητας των συνθηκών.
- Προσαρμοστικότητα σε τύπους πλοίων: Τα συστήματα λίπανσης αέρα πρέπει να προσαρμόζονται σε διάφορους τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, των δεξαμενόπλοιων και των επιβατηγών πλοίων. Η πρόκληση έγκειται στην ανάπτυξη συστημάτων που μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να ταιριάζουν στα συγκεκριμένα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά και τις λειτουργικές απαιτήσεις κάθε κατηγορίας σκαφών.

- **Μεταβλητές ταχύτητες και συνθήκες φορτίου:** Τα πλοία λειτουργούν συχνά με διαφορετικές ταχύτητες και υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου. Τα συστήματα λίπανσης αέρα πρέπει να είναι σε θέση να διατηρούν την αποτελεσματικότητά τους σε αυτές τις διακυμάνσεις ταχύτητας και φορτίου. Αυτή η προσαρμοστικότητα διασφαλίζει ότι τα πλοία μπορούν να μεγιστοποιήσουν την εξοικονόμηση καυσίμων και τις μειώσεις εκπομπών ανεξάρτητα από το λειτουργικό τους προφίλ.
- **Μεταβλητότητα κατάστασης θάλασσας:** Η αλλαγή της κατάστασης της θάλασσας, που χαρακτηρίζεται από ύψη και κατευθύνσεις κύματος, μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των συστημάτων λίπανσης αέρα. Η διασφάλιση ότι αυτές οι τεχνολογίες παραμένουν αποτελεσματικές και σταθερές σε καταστάσεις έντονου κυματισμού αποτελεί σημαντική πρόκληση. Προηγμένοι αλγόριθμοι ελέγχου και σχεδιασμοί συστημάτων απόκρισης είναι απαραίτητα για την αντιμετώπιση αυτής της μεταβλητότητας. Οι καιρικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένου του ανέμου και της βροχόπτωσης, μπορούν επίσης να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων λίπανσης αέρα. Η πρόληψη της διακοπής του συστήματος ή της ακούσιας απελευθέρωσης φυσαλίδων λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών είναι μια κρίσιμη πτυχή για τη διασφάλιση της συμβατότητας. Επιπλέον ορισμένοι τύποι πλοίων λειτουργούν σε ακραία περιβάλλοντα, όπως πολικές περιοχές με συνθήκες πάγου. Η διασφάλιση ότι τα συστήματα λίπανσης αέρα παραμένουν λειτουργικά και αποτελεσματικά σε τέτοια σκληρά περιβάλλοντα παρουσιάζει πρόσθετες μηχανικές και λειτουργικές προκλήσεις.

### 3.3.3 Διαθέσιμες τεχνολογίες αέριας λίπανσης σε πλοία

Οι τεχνολογίες λίπανσης αέρα στη ναυτιλιακή βιομηχανία έχουν κερδίσει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια λόγω των δυνατοτήτων τους να ενισχύσουν τη λειτουργική απόδοση και τη βιωσιμότητα των πλοίων. Αυτές οι τεχνολογίες έχουν σχεδιαστεί για να μειώνουν την τριβή μεταξύ του κύτους του πλοίου και του περιβάλλοντος νερού, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση καυσίμου, μειωμένες εκπομπές και, τελικά, εξοικονόμηση κόστους. Για την επίτευξη αυτών των στόχων έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι και συστήματα λίπανσης αέρα. Παρακάτω περιγράφονται μερικές από τις βασικές διαθέσιμες τεχνολογίες:

- **Φυσαλίδες αέρα (Air Bubbles):** Μία από τις πιο κοινές τεχνικές λίπανσης αέρα περιλαμβάνει την απελευθέρωση μικρών φυσαλίδων από το κύτος του πλοίου, συνήθως από σχισμές ή αεραγωγούς που βρίσκονται κατά μήκος του πυθμένα του



σκάφους. Αυτές οι φυσαλίδες ανεβαίνουν στην επιφάνεια του νερού και δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα αέρα μεταξύ του κύτους και του νερού. Αυτό το στρώμα αέρα μειώνει σημαντικά την υδροδυναμική αντίσταση στο πλοίο, διευκολύνοντας το σκάφος να κινηθεί μέσα στο νερό. Εταιρείες όπως η Silverstream Technologies και η Mitsubishi Heavy Industries έχουν αναπτύξει και εμπορευματοποιήσει συστήματα φυσαλίδων αέρα.

- Μικροφυσαλίδες (Air Bubbles): Ορισμένα συστήματα λίπανσης αέρα χρησιμοποιούν εξαιρετικά λεπτές μικροφυσαλίδες που εγχέονται στο οριακό στρώμα κάτω από τον πυθμένα του πλοίου. Αυτές οι μικροφυσαλίδες δημιουργούν ένα μαξιλάρι αέρα που μειώνει περαιτέρω την τριβή και το πλοίο σύρεται καθώς ταξιδεύει μέσα στο νερό. Η Echogen Power Systems, για παράδειγμα, έχει αναπτύξει το Microbubble Air Lubrication System (MALS) με βάση αυτή την αρχή.
- Αναρρόφηση οριακού στρώματος (Boundary Layer Suction): Μια άλλη προσέγγιση περιλαμβάνει την ενεργή αφαίρεση του νερού από το οριακό στρώμα γύρω από το κύτος του πλοίου χρησιμοποιώντας αντλίες ή συσκευές αναρρόφησης. Με την εκκένωση του νερού από αυτή την περιοχή, δημιουργείται ένα κενό αέρα, μειώνοντας την αντίσταση που συναντά το κύτος του πλοίου. Το Mitsubishi Air Lubrication System (MALS) της Mitsubishi Heavy Industries χρησιμοποιεί αυτή τη μέθοδο.
- Εγκαταστάσεις εμφύσησης: Οι συσκευές εμφύσησης έχουν σχεδιαστεί για να φυσούν πεπιεσμένο αέρα απευθείας στο κύτος του πλοίου, δημιουργώντας πάλι ένα μαξιλάρι αέρα. Αυτή η συνεχής ροή αέρα μειώνει την τριβή και την οπισθέλκουσα, συμβάλλοντας στη βελτιωμένη απόδοση. Η Wärtsilä, μια φινλανδική εταιρεία, προσφέρει λύσεις που βασίζονται σε αυτήν την τεχνολογία.
- Σχεδιασμός κύτους (Hull Design): Ορισμένα σχέδια πλοίων ενσωματώνουν εξειδικευμένα σχήματα κύτους που δημιουργούν φυσικά ένα αποτέλεσμα λίπανσης αέρα. Αυτά τα σχέδια αξιοποιούν αρχές εμπνευσμένες από θαλάσσια είδη όπως τα δελφίνια, τα οποία είναι γνωστά για την υδροδυναμική τους απόδοση. Η εφαρμογή τέτοιων σχεδίων κύτους μπορεί να απαιτεί την κατασκευή νέων σκαφών ή σημαντικές τροποποιήσεις σε υπάρχοντα. Μελέτες διερευνούν ολοένα και περισσότερο βιο-μιμητικές προσεγγίσεις στο σχεδιασμό του κύτους, αντλώντας έμπνευση από τη φύση για να αναπτύξουν πλοία με μειωμένη αντίσταση και βελτιωμένη συνολική απόδοση.

Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων λίπανσης αέρα μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως το μέγεθος του σκάφους, η ταχύτητα και οι συνθήκες λειτουργίας. Ωστόσο, όταν εφαρμοστούν με επιτυχία, αυτές οι τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν σημαντικά στις προσπάθειες της ναυτιλιακής βιομηχανίας να μειώσει το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα, να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου και να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Καθώς η βιωσιμότητα γίνεται ολοένα και πιο κρίσιμος στόχος για τον ναυτιλιακό τομέα, τα συστήματα λίπανσης αέρα είναι έτοιμα να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του μέλλοντος των θαλάσσιων μεταφορών.

#### 3.3.4 Silverstream® System

Το Silverstream® System, αναπτύχθηκε από την Silverstream Technologies, αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία λίπανσης αέρα σε πλοία. Αυτό το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να μειώνει την αντίσταση τριβής μεταξύ του κύτους του πλοίου και του νερού, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση καυσίμου και χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η τεχνολογία υιοθετείται ολοένα και περισσότερο στη ναυτιλιακή βιομηχανία λόγω της αποτελεσματικότητάς της και των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της.

Το σύστημα χρησιμοποιεί Air Release Units (ARUs) για να δημιουργήσει ένα χαλί από μικροφουσαλίδες που καλύπτουν τον επίπεδο πυθμένα του πλοίου. Αυτές οι φυσαλίδες μειώνουν την αντίσταση του νερού στο κύτος. Η τεχνολογία έχει αποδειχθεί ότι παρέχει καθαρά κέρδη απόδοσης. Σε διάφορες θαλάσσιες δοκιμές, έχει αποδείξει εξοικονόμηση ενέργειας άνω του 5%. Τα μεγαλύτερα πλοία, όπως τα πλοία μεταφοράς LNG και τα Ro-Ros, με μεγαλύτερο επίπεδο πυθμένα, μπορούν να έχουν εξοικονόμηση από 8-10%. Είναι κατάλληλο τόσο για νέες κατασκευές όσο και για εκ των υστέρων εγκαταστάσεις. Η εφαρμογή του στη βιομηχανία κρουαζιέρας ήταν ιδιαίτερα αξιοσημείωτη, με εγκαταστάσεις σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια όπως το Norwegian Joy.

Βελτιώνοντας την απόδοση καυσίμου, το σύστημα Silverstream® συμβάλλει στη σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Αυτό είναι ένα κρίσιμο πλεονέκτημα, λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη εστίαση της ναυτιλιακής βιομηχανίας στη μείωση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος. Το σύστημα επίσης ελαχιστοποιεί το θόρυβο και τους κραδασμούς ενώ οι φυσαλίδες αέρα βοηθούν στη διατήρηση του κύτους καθαρού εμποδίζοντας την ανάπτυξη επικαθίσεων, που μπορούν να δημιουργήσουν πρόσθετη αντίσταση.

Η ναυτιλιακή βιομηχανία δείχνει αυξανόμενο ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνολογία. Μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες, όπως η MSC Mediterranean Shipping Company, έχουν κάνει σημαντικές παραγγελίες για να εξοπλίσουν τους στόλους τους με το σύστημα Silverstream®. Η προσδοκία είναι ότι τα συστήματα λίπανσης αέρα όπως το Silverstream® θα γίνουν βασικό χαρακτηριστικό στις παραγγελίες νέων σκαφών, με γνώμονα τόσο την αποτελεσματικότητα όσο και τους περιβαλλοντικούς λόγους.

SHIP TYPE	SYSTEM OPERATIONAL SPEED (KTS)	TYPICAL OPERATIONAL DRAUGHT (M)	FLAT OF BOTTOM AS A % OF TOTAL WSA	NET SAVINGS SILVERSTREAM® SYSTEM PERFORMANCE
Cruise Ship	10-20	8-9	30-35%	5%-7%
New Generation RoRo	10-22	7-8	26-32%	5%-7%
Containership (>9,000 TEU)	10-23	14-16	25-30%	5%-6.5%
Gas Carriers (LNGC, VLECs and VLGCs)	10-19	9-12	35-40%	6%-9%
Large Wet & Dry Bulk Carrier (>100k DWT)	10-15	13-20	25-45%	6%-11%

Εικόνα 28: Χαρακτηριστικά εφαρμογής συστήματος Silverstream® System σε διάφορα είδη πλοίων (Silverstream Technologies, 2023)

### 3.3.5 Mitsubishi Air Lubrication System (MALS)

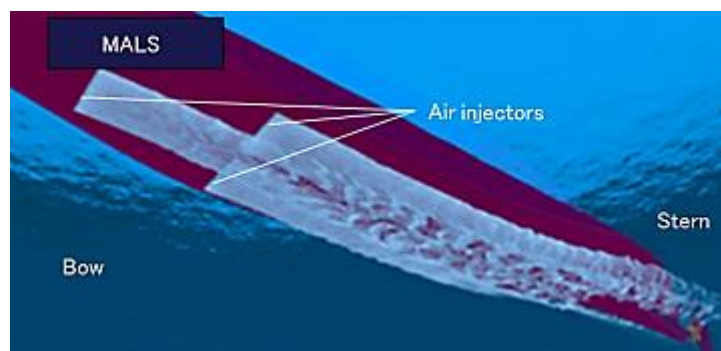
Το Mitsubishi Air Lubrication System (MALS) αντιπροσωπεύει μια σημαντική καινοτομία στη ναυτιλιακή τεχνολογία, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση καυσίμου για μεγάλα πλοία. Αναπτύχθηκε από τη Mitsubishi Heavy Industries, το MALS μειώνει την τριβή μεταξύ του κύτους του πλοίου και του περιβάλλοντος νερού μέσω της δημιουργίας ενός στρώματος φυσαλίδων αέρα. Το σύστημα χρησιμοποιεί εξειδικευμένες συσκευές φυσητήρα που παρέχουν αέρα στον πυθμένα του πλοίου, όπου είναι στρατηγικά τοποθετημένες οι έξοδοι. Αυτή η τοποθέτηση είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική κατανομή των φυσαλίδων αέρα στο κύτος.

Η τεχνολογία έχει εφαρμοστεί σε διάφορους τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των οχηματαγωγών, επιδεικνύοντας αξιοσημείωτη μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Τα κέρδη απόδοσης του συστήματος είναι ιδιαίτερα εμφανή σε μεγάλα σκάφη, τα οποία επωφελούνται από τη σημαντική μείωση της αντίστασης στο νερό (KAWAKITA, και συν., 2015).

Οι φυσητήρες που χρησιμοποιούνται στο MALS έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν αποτελεσματικά τον απαραίτητο όγκο αέρα για τη δημιουργία του λιπαντικού στρώματος. Αυτός ο σχεδιασμός είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

Οι δυνατότητές του για σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων το καθιστούν ελκυστική επιλογή για τους ναυπηγούς και τους χειριστές. Η υιοθέτησή του αναμένεται να αυξηθεί καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία συνεχίζει να δίνει προτεραιότητα στην ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Αναμένονται συνεχείς αναβαθμίσεις και βελτιστοποιήσεις στο σύστημα, καθώς η Mitsubishi Heavy Industries συνεχίζει να βελτιώνει και να προσαρμόζει την τεχνολογία ώστε να ταιριάζει σε ένα ευρύτερο φάσμα πλοίων και λειτουργικών συνθηκών.



Εικόνα 29: Εικόνα πλοίου εξοπλισμένου με MALS. Ο πυθμένας του πλοίου καλύπτεται από φυσαλίδες αέρα που απελευθερώνονται από τους εγχυτήρες αέρα (KAWAKITA, και συν., 2015).

### 3.3.6 Επίπεδα ετοιμότητας τεχνολογίας λίπανσης αέρα (TRL)

**Φυσαλίδες αέρα:** Τα συστήματα φυσαλίδων αέρα έχουν προχωρήσει στο στάδιο όπου τα πρωτότυπα πλήρους κλίμακας έχουν επιδειχθεί με επιτυχία σε επιχειρησιακά πλοία. Αξιοσημείωτα παραδείγματα περιλαμβάνουν πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων εξοπλισμένα με συστήματα φυσαλίδων αέρα. Αυτό το επίπεδο TRL υποδεικνύει ενεργή παρακολούθηση της απόδοσης του συστήματος, της κατανάλωσης ενέργειας και των απαιτήσεων συντήρησης, καθώς και επικύρωση της αποτελεσματικότητας της τεχνολογίας σε πραγματικές συνθήκες.

**Εκτιμώμενο TRL: 6 -7.** Πρωτότυπο συστήματος που επιδεικνύεται σε λειτουργικό περιβάλλον.

**Μικροφυσαλίδες:** Τα συστήματα μικροφυσαλίδων έχουν υποβληθεί σε δοκιμές σε σχετικά θαλάσσια περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων δεξαμενών ρυμούλκησης και δοκιμών μοντέλων σε φυσικά ύδατα. Πλοία όπως φορτηγά πλοία και δεξαμενόπλοια έχουν ενσωματώσει τεχνολογία μικροφυσαλίδων για μείωση της οπισθέλκουσας. Αυτό το TRL

αντικατοπτρίζει τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την απόδοση και την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας στον πραγματικό κόσμο σε διαφορετικούς τύπους και ταχύτητες πλοίων.

Εκτιμώμενο TRL: 5-6. Τεχνολογία επικυρωμένη σε σχετικό περιβάλλον.

Αναρρόφηση οριακού στρώματος: Τα συστήματα αναρρόφησης οριακού στρώματος αναπτύσσονται ενεργά σε διάφορα πλοία, συμπεριλαμβανομένων των κρουαζιερόπλοιων και των οχηματαγωγών. Αυτό το επίπεδο TRL σημαίνει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σχετικά με την εξοικονόμηση καυσίμων, τις μειώσεις εκπομπών και την αξιοπιστία του συστήματος υπό πραγματικές θαλάσσιες συνθήκες.

Εκτιμώμενο TRL: 6-7. Σύστημα που επιδεικνύεται σε λειτουργικό περιβάλλον.

Τεχνολογία Εμφύσησης: Οι συσκευές εμφύσησης που χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα είναι προσαρμόσιμες και μπορούν να τοποθετηθούν εκ των υστέρων σε υπάρχοντα πλοία. Παραδείγματα περιλαμβάνουν φορτηγά πλοία και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων εξοπλισμένα με συστήματα λίπανσης αέρα. Αυτή η εκτίμηση αντικατοπτρίζει την συμβατότητα και την ευρεία εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, με έμφαση στη λειτουργική ανάπτυξη.

Εκτιμώμενο TRL: 6-7. Σύστημα που επιδεικνύεται σε λειτουργικό περιβάλλον.

Σχεδιασμός Κύτους πλοίου: Τα εξειδικευμένα σχέδια εμπνευσμένα από τη φύση, όπως αυτά που μιμούνται τα χαρακτηριστικά θαλάσσιων πλασμάτων, βρίσκονται στο στάδιο επικύρωσης, κυρίως μέσω εργαστηριακών δοκιμών. Αυτά τα σχέδια συνήθως διερευνώνται κατά την κατασκευή νέων σκαφών ή σε σημαντικές τροποποιήσεις σε υπάρχοντα. Τα παραδείγματα περιλαμβάνουν φιλικά προς το περιβάλλον φορτηγά πλοία σχεδιασμένα με βελτιστοποιημένα σχήματα κύτους.

Εκτιμώμενο TRL: 4-5. Τεχνολογία επικυρωμένη στο εργαστήριο.

Βιο-μιμητικά σχέδια: Τα βιομιμητικά σχέδια, εμπνευσμένα από θαλάσσιους οργανισμούς, βρίσκονται στο στάδιο της πειραματικής απόδειξης της ιδέας. Ερευνητές και μηχανικοί μελετούν τις δυνατότητες αυτών των σχεδίων για μελλοντικές καινοτομίες στον σχεδιασμό πλοίων. Αν και δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη σε συγκεκριμένα πλοία, η συνεχιζόμενη έρευνα στοχεύει να επηρεάσει πιο αποτελεσματικά τα σχήματα κύτους στο μέλλον.

Εκτιμώμενο TRL: 3. Πειραματική απόδειξη της ιδέας.

Αυτές οι εκτιμήσεις TRL λαμβάνουν υπόψη την τρέχουσα πρόοδο, τις τάσεις και τα πρακτικά παραδείγματα που παρατηρούνται στις τεχνολογίες λίπανσης αέρα στον ναυτιλιακό τομέα.

Οι πραγματικές τιμές TRL για συγκεκριμένες εφαρμογές ή παραλλαγές κάθε τεχνολογίας ενδέχεται να ποικίλλουν και θα πρέπει να επιβεβαιώνονται με την τελευταία έρευνα και τις αντίστοιχες εκθέσεις του κλάδου για ακριβείς αξιολογήσεις.

Πίνακας 4: Τεχνολογίες αερίων λίπανσης και εκτίμηση κατάστασης ωριμότητας

Τεχνολογία	Μηχανισμός	Εκτιμώμενο TRL	Αιτιολόγηση TRL/Πηγές
Φυσαλίδες αέρα (Air Bubbles)	Μικρές φυσαλίδες που μειώνουν την υδροδυναμική αντίσταση.	6-7	Βασισμένο στην επιχειρησιακή χρήση σε πλοία και στις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι φυσαλίδες αέρα σε χαμηλότερες ταχύτητες. Πηγές: (Safety4Sea, 2019) (TMC, 2020).
Μικροφυσαλίδες (Micro-Air Bubbles)	Μίκρο-φυσαλίδες που δημιουργούν ένα ομοιόμορφο αερόστρωμα, μειώνοντας την αντίσταση.	5-6	Πλήρεις δοκιμές πρωτότυπων μοντέλων και αυξανόμενη δημοτικότητα για την εφαρμογή τους σε υπάρχουσες κατασκευές πλοίων. Πηγή: (TMC, 2020).
Αναρρόφηση οριακού στρώματος (Boundary Layer Suction)	Ενεργητική αφαίρεση νερού από την οριακό στρώμα.	6-7	Παρόμοια ετοιμότητα με το BDR, εγκατεστημένη σε επιχειρησιακά περιβάλλοντα. Πηγή: (Safety4Sea, 2019).
Εγκαταστάσεις εμφύσησης αέρα	Συμπιεσμένος αέρας που δημιουργεί ένα αερόστρωμα για τη μείωση της αντίστασης.	6-7	Η τεχνολογία είναι προσαρμόσιμη και μπορεί να ενσωματωθεί ως αναβάθμιση, δείχνοντας ένταξη σε υπάρχοντα συστήματα. Πηγή: (SAFETY4SEA, 2022).
Σχεδιασμός Κύτους (Hull Shape)	Ειδικά σχήματα κύτους	4-5	Ποικίλλει ανάλογα με το συγκεκριμένο σχεδιασμό και στάδιο ανάπτυξης, περιλαμβάνει την κατασκευή νέων πλοίων ή σημαντικές τροποποιήσεις.
Βιο-μιμητικά Σχέδια	Σχεδιασμοί κύτους εμπνευσμένα από θαλάσσιους οργανισμούς που βελτιστοποιούν την υδροδυναμική.	3-4	Στο στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης, δεν έχουν ακόμη δοκιμαστεί πλήρως ή ενσωματωθεί σε επιχειρησιακά περιβάλλοντα για τις αναδυόμενες βιο-μιμητικές ιδέες στην τεχνολογία ναυσιπλοΐας.

### 3.4 Ελαφρά Υλικά (Lightweight Materials)

Η υιοθέτηση ελαφρών υλικών αναδεικνύεται ως βασική στρατηγική για την αύξηση της αποδοτικότητας των πλοίων, περιορίζοντας ταυτόχρονα το αποτύπωμα άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Σε αυτή την ενότητα διερευνάται η εφαρμογή των ελαφρών υλικών στη ναυτιλία, οριοθετώντας τις διάφορες τυπολογίες ελαφρών υλικών, και περιγράφοντας τις εγγενείς ιδιότητές τους και αναλύοντας τις διαφοροποιημένες εφαρμογές τους για την επίτευξη ουσιαστικής μείωσης των εκπομπών GHG.

Οι τύποι των ελαφρών υλικών συνοψίζονται παρακάτω (ÇAĞLAYAN,, et al., 2020):

- Προηγμένα σύνθετα: Τα προηγμένα σύνθετα υλικά, με την ανάπτυξη πολυμερών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα (CFRP) και πολυμερών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού (GFRP), αποτελούν την πρωτοπορία στη μηχανική θαλάσσιων υλικών. Αυτά τα υλικά συνδυάζουν εξαιρετική αντοχή με μικρή σχετικά μάζα, ενώ ταυτόχρονα διαθέτουν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Το CFRP και το GFRP, που μέχρι τώρα θεωρούνταν υλικά της αεροδιαστημικής, έχουν διεισδύσει στον θαλάσσιο τομέα, με εφαρμογές που επεκτείνονται στα κύττη των πλοίων, σε κατασκευές καταστρώματος και μια σειρά από εξαρτήματα πλοίων. Η στρατηγική ολοκλήρωσή τους προκαλεί μια αλλαγή παραδείγματος στον σχεδιασμό του σκάφους, ενισχύοντας τη βαθιά μείωση του βάρους, την αυξημένη απόδοση καυσίμου και την ανάλογη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Κράματα αλουμινίου: Η θαλάσσια μηχανική έχει αναγνωρίσει την δυνατότητα των κραμάτων αλουμινίου. Αυτά χαρακτηρίζονται από τον συνδυασμό χαμηλής πυκνότητας και υψηλής αντοχής στη διάβρωση. Τα υλικά αυτά έχουν εφαρμοστεί, με τρόπο τέτοιο ώστε να αξιοποιηθούν οι δυνατότητές τους στην κατασκευή καταστρωμάτων, διαφραγμάτων και μιας σειράς ελαφρών εξαρτημάτων. Η ισορροπία μεταξύ ανθεκτικότητας και μείωσης βάρους διευκολύνει την επαναβαθμονόμηση της ναυτιλιακής αρχιτεκτονικής, με αποκορύφωμα την αυξημένη σταθερότητα και τη συνακόλουθη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Χάλυβες υψηλής αντοχής: Οι χάλυβες υψηλής αντοχής, εμβληματικοί της τεχνολογικής εφευρετικότητας, έχουν αναδειχθεί ως συνδετήρες στο οπλοστάσιο των υλικών κατασκευής πλοίων. Αυτοί οι χάλυβες, μέσω της αύξησης των μηχανικών ιδιοτήτων τους, δίνουν τη δυνατότητα στους σχεδιαστές πλοίων να σμιλεύουν ελαφρύτερες αλλά στιβαρές κατασκευές. Παρά την ταξινόμησή τους ως «χάλυβας»,

αυτά τα υλικά, μέσω ακριβούς κράματος, προκαλούν το συμβατικό βάρος που σχετίζεται με τα σιδηρούχα μέταλλα. Διασυνδέονται με το κύτος των πλοίων, τα δομικά στοιχεία και τα φέροντα στοιχεία, προσφέροντας μια ισχυρή οδό για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μέσω της συνετής μείωσης του βάρους.

Οι εφαρμογές των ελαφρών υλικών συνοψίζονται παρακάτω (Noury, et al., 2022):

- Κατασκευή κύτους: Η καινοτομία στο χώρο του σχεδιασμού των πλοίων είναι στις νέες κατασκευές ή στις διαμορφώσεις του κύτους του πλοίου. Τα ελαφρά υλικά δημιουργούν μεταμορφωτικά αποτελέσματα. Η άνωση του σκάφους, που βασίζεται στη μετατόπιση του νερού, εξαρτάται από παράγοντες βάρους. Αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά, πυκνότερα υλικά με προηγμένα σύνθετα υλικά, κράματα αλουμινίου ή χάλυβες υψηλής αντοχής, οι ναυπηγοί μειώνουν το βάρος, αυξάνοντας έτσι την άνωση και δημιουργώντας υδροδυναμική απόδοση. Πάντα, αυτό οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και, αναλογικά, σε αισθητή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια των επιχειρησιακών διαδρομών.
- Κατασκευές καταστρώματος και εξαρτήματα: Εκτός από τις κατασκευές κύτους πλοίων, τα ελαφρά υλικά έχουν κομβικό ρόλο στην κατασκευές καταστρώματος, καμπινών και μιας σειράς εξαρτημάτων πλοίων. Οι κατασκευές καταστρώματος από αλουμίνιο, για παράδειγμα, είναι κρίσιμες σε ζητήματα βάρους, παρέχοντας ταυτόχρονα αυξημένη σταθερότητα στα πλοία και συμβάλλοντας στον επακόλουθο μετριασμό των εκπομπών GHG κατά τις επιχειρησιακές φάσεις.
- Μετασκευή και εκσυγχρονισμός: Το θαλάσσιο τοπίο αναδιαμορφώνεται περαιτέρω μέσω της μετασκευής υφιστάμενων πλοίων με ελαφριά υλικά. Αυτή η ρεαλιστική στρατηγική οραματίζεται την αντικατάσταση των βαρέων εξαρτημάτων με τα ελαφριά ανάλογα τους, δίνοντας έτσι μια ουσιαστική αναμόρφωση σε παλαιότερα πλοία. Με αυτό το τρόπο, όχι μόνο ενισχύονται οι επιδόσεις, αλλά μειώνονται και οι εκπομπές GHG, καθιστώντας τα γηρασμένα πλοία με περιβαλλοντικά βιώσιμη προοπτική.



### 3.4.1 Προκλήσεις εφαρμογής ελαφρών υλικών στη ναυτιλία

Η χρήση ελαφρών υλικών στη ναυτική βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένων προηγμένων σύνθετων υλικών και κραμάτων αλουμινίου, παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση της απόδοσης των καυσίμων και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η εφαρμογή τους ενέχει σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν:

- Υψηλό αρχικό κόστος: Ένα από τα κύρια εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση ελαφρών υλικών στη ναυτιλία είναι το κόστος τους. Αυτά τα υλικά συνήθως έχουν υψηλότερη τιμή σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά όπως ο χάλυβας. Αυτός ο παράγοντας κόστους γίνεται ακόμη πιο σημαντικός αν ληφθούν υπόψη οι μεγάλοι όγκοι που απαιτούνται στις κατασκευές πλοίων. Η οικονομική σκοπιμότητα της χρήσης τέτοιων υλικών αποτελεί βασικό στοιχείο στο στάδιο του σχεδιασμού και των αποφάσεων από τους φορείς εκμετάλλευσης.
- Ανησυχίες σχετικά με την αντοχή και την ανθεκτικότητα: Αν και αυτά τα υλικά προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι είναι χαμηλότερου βάρους, πρέπει ταυτόχρονα να ανταποκρίνονται στις αυστηρές απαιτήσεις αντοχής και ανθεκτικότητας που απαιτούνται για θαλάσσια περιβάλλοντα. Τα πλοία εκτίθενται σε μια ποικιλία σκληρών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένης της διάβρωσης, των ακραίων καιρικών συνθηκών και των συνεχών τάσεων φόρτωσης και εκφόρτωσης. Η διασφάλιση ότι τα ελαφριά υλικά μπορούν να αντέξουν αυτές τις συνθήκες για μεγάλες περιόδους είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή τους στη ναυτική βιομηχανία.
- Πολυπλοκότητες στην επισκευή και τη συντήρηση: Η επισκευή και η συντήρηση των πλοίων που χρησιμοποιούν προηγμένα ελαφριά υλικά μπορεί να είναι πιο περίπλοκη και δαπανηρή από τα παραδοσιακά πλοία. Αυτά τα υλικά απαιτούν συχνά εξειδικευμένες γνώσεις και εργαλεία για επισκευές, τα οποία μπορεί να μην είναι άμεσα διαθέσιμα σε όλα τα ναυπηγεία. Επιπλέον, το κόστος συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική οικονομία της χρήσης ελαφρών υλικών.
- Πρότυπα πυρασφάλειας: Η πυρασφάλεια αποτελεί πρωταρχικό μέλημα στο σχεδιασμό του πλοίου. Τα ελαφριά υλικά πρέπει να τηρούν αυστηρά πρότυπα πυραντίστασης για να διασφαλίζεται η ασφάλεια του σκάφους και του πληρώματος του. Ωστόσο, η επίτευξη του απαραίτητου επιπέδου αντοχής στη φωτιά μπορεί να είναι πιο δύσκολη με ορισμένα ελαφριά υλικά σε σύγκριση με τις παραδοσιακές επιλογές.

- Περιβαλλοντικοί προβληματισμοί και δυνατότητα ανακύκλωσης: Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της χρήσης ελαφρών υλικών εκτείνεται πέρα από τη διάρκεια ζωής τους. Η δυνατότητα ανακύκλωσης και η απόρριψη στο τέλος του κύκλου ζωής αυτών των υλικών είναι κρίσιμοι παράγοντες. Η ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμων διαδικασιών ανακύκλωσης για προηγμένα σύνθετα υλικά και άλλα ελαφριά υλικά είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του συνολικού περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος.
- Ενσωμάτωση με υπάρχοντα σχέδια πλοίων: Η ενσωμάτωση ελαφρών υλικών σε υπάρχοντα σχέδια πλοίων ή η μετασκευή παλαιότερων σκαφών με αυτά τα υλικά παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις μηχανικής. Περιλαμβάνει την προσεκτική εξισορρόπηση του βάρους, της σταθερότητας και της δομικής ακεραιότητας του πλοίου. Αυτή η διαδικασία ολοκλήρωσης απαιτεί συχνά εκτεταμένο επανασχεδιασμό και δοκιμές για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η απόδοση.
- Πλοήγηση και Κανονιστική Συμμόρφωση: Η ναυτιλιακή βιομηχανία υπόκειται σε αυστηρούς κανονισμούς και πρότυπα, με τα οποία πρέπει να συμμορφώνεται κάθε νέο υλικό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή πλοίων. Η πλοήγηση σε αυτούς τους κανονισμούς, η απόκτηση των απαραίτητων πιστοποιήσεων και η διασφάλιση της συμμόρφωσης μπορεί να είναι μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία.
- Αποδοχή και εκπαίδευση: Η αποδοχή νέων υλικών στην αγορά εξαρτάται επίσης από την εκπαίδευση και την ετοιμότητα του εργατικού δυναμικού. Οι ναυπηγοί, οι μηχανικοί και τα πληρώματα συντήρησης πρέπει να είναι επαρκώς εκπαιδευμένοι στο χειρισμό και την εργασία με αυτά τα νέα υλικά. Αυτό απαιτεί επενδύσεις σε προγράμματα κατάρτισης και ανταλλαγή γνώσεων για να διασφαλιστεί η ομαλή μετάβαση.

### 3.4.2 Διαθέσιμες τεχνολογίες ελαφρών υλικών σε πλοία

- Χύτευση Ρητίνης (Resin Transfer Molding (RTM)): Αυτή η διαδικασία κατασκευής χρησιμοποιείται για σύνθετα υλικά, όπου η υγρή ρητίνη εγχέεται σε ένα καλούπι που περιέχει ένα ξηρό πρόπλασμα ινών. Είναι ιδανικό για την κατασκευή μεγάλων, πολύπλοκων σχημάτων με φινιρίσματα επιφανειών υψηλής ποιότητας, όπως περιγράφονται λεπτομερώς σε μελέτες και βιομηχανικές εφαρμογές.

- Διαδικασία έγχυσης κενού ( Vacuum Infusion Process (VIP) ): Μια τεχνική για τη δημιουργία σύνθετων υλικών όπου το κενό αναρροφά τη ρητίνη σε ένα στρώμα ξηρής ίνας, παράγοντας υλικά υψηλής ποιότητας με άριστες αναλογίες αντοχής προς βάρος.
- Περιέλιξη νήματος (Filament Winding): Σε αυτή τη διαδικασία, οι συνεχείς ενισχυμένες ίνες τοποθετούνται με ακρίβεια σε ένα προκαθορισμένο σχέδιο τυλίγοντάς τες υπό τάση πάνω από έναν περιστρεφόμενο άξονα. Χρησιμοποιείται συνήθως για την κατασκευή κυλινδρικών και ελαφρώς κωνικών σχημάτων όπως κύτους και ιστών.
- Πολτοποίηση (Pultrusion): Μια αυτοματοποιημένη διαδικασία για την κατασκευή σύνθετων υλικών σε συνεχή μήκη σταθερής διατομής, που σχετίζεται με την παραγωγή μακριών, ευθύγραμμων εξαρτημάτων όπως δοκοί ή οπλισμοί κύτους. Αυτή η τεχνολογία αναφέρεται συχνά στην κατασκευή θαλάσσιων κατασκευών.
- Συγκόλληση με λέιζερ και δέσμη ηλεκτρονίων (Laser and Electron-Beam Welding): Προηγμένες τεχνικές συγκόλλησης για τη σύνδεση ελαφρών υλικών όπως το αλουμίνιο και το τιτάνιο, που προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και έλεγχο.
- Συγκόλληση με τριβή ανάδευσης (Friction Stir Welding, FSW): Μια διαδικασία σύνδεσης στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιείται κυρίως για αλουμίνιο και άλλα μαλακά μέταλλα, ιδιαίτερα ευεργετική στον ναυτιλιακό τομέα για τη συγκόλληση μεγάλων πάνελ και κατασκευών.
- Αυτοματοποιημένη τοποθέτηση ινών (Automated Fiber Placement (AFP)): Μια διαδικασία που χρησιμοποιείται στην κατασκευή σύνθετων υλικών, όπου ένα ρομπότ τοποθετεί τις ταινίες ινών σε ένα καλούπι, ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία μεγάλων, πολύπλοκων σχημάτων που απαιτούνται σε προηγμένες θαλάσσιες κατασκευές.
- Τρισδιάστατη εκτύπωση/Κατασκευή πρόσθετων (3D Printing/Additive Manufacturing): Περιλαμβάνει επιλεκτική τήξη λέιζερ (SLM), τήξη δέσμης ηλεκτρονίων (EBM) και μοντελοποίηση λιωμένης εναπόθεσης (FDM) για μέταλλα και σύνθετα υλικά, επιτρέποντας περίπλοκες γεωμετρίες και ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων, όπως αποδεικνύεται από τις πρόσφατες εξελίξεις στη θαλάσσια κατασκευή.
- Ψυχρή διαμόρφωση μετάλλων (Cold Forming of Metals ): Μια διαδικασία κατά την οποία τα μέταλλα διαμορφώνονται σε θερμοκρασία δωματίου για να διατηρηθεί η αντοχή και οι ελαφριές ιδιότητές τους. Κοινή στη διαμόρφωση εξαρτημάτων

αλουμινίου και χάλυβα υψηλής αντοχής, αυτή η τεχνική είναι ζωτικής σημασίας για την ελαφριά κατασκευή σε ναυτιλιακές εφαρμογές.

- Τεχνικές Νανο-Βελτίωσης (Nano-Enhancement Techniques): Αυτές περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση νανοϋλικών σε σύνθετα υλικά ή επιστρώσεις για ενίσχυση ιδιοτήτων όπως αντοχή, ακαμψία και μείωση βάρους. Η εφαρμογή της νανοτεχνολογίας στην επιστήμη των υλικών είναι ένας αναπτυσσόμενος τομέας, με σημαντικές εφαρμογές στη θαλάσσια μηχανική.
- Τεχνολογίες προστασίας από τη διάβρωση (Corrosion Protection Technologies): Οι προηγμένες τεχνικές επίστρωσης και ανοδίωσης που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για ελαφρά μέταλλα παρατείνουν τη διάρκεια ζωής τους και διατηρούν τα ελαφριά χαρακτηριστικά τους σε σκληρά θαλάσσια περιβάλλοντα. Αυτές οι τεχνολογίες είναι ζωτικής σημασίας για τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και απόδοση των πλοίων.

Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες είναι αναπόσπαστο μέρος της εφαρμογής ελαφρών υλικών στον ναυτιλιακό τομέα. Αντιπροσωπεύουν τη διασταύρωση της επιστήμης των υλικών και των προηγμένων κατασκευαστικών τεχνικών, καλύπτοντας τις εξελισσόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων ναυτιλιακών επιχειρήσεων. Αυτές οι τεχνολογίες συμβάλλουν στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών, βιώσιμων και υψηλών επιδόσεων πλοίων, αντανakλώντας τη συνεχιζόμενη καινοτομία στον τομέα αυτό (Crupi, et al., 2023) (Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting, 2012).

Πίνακας 5: Κατάσταση τεχνολογικής ωριμότητας των τεχνολογιών ελαφρών υλικών στη ναυτιλία

Τεχνολογία	Περιγραφή	Εκτίμηση TRL	Αιτιολόγηση
Resin Transfer Molding (RTM)	Μέθοδος για την κατασκευή σύνθετων υλικών όπου η ρητίνη εγχέεται σε καλούπι σε συνδυασμό με ίνες.	6-7	Εδραιωμένη σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, προσπάθειες εφαρμογής στη ναυτιλία.
Vacuum Infusion Process (VIP)	Μέθοδος για τη δημιουργία σύνθετων υλικών με ρητίνη σε μια ξηρή διάταξη ινών υπό κενό.	6-7	Χρησιμοποιείται στη δημιουργία σύνθετων υλικών για βιομηχανικές εφαρμογές, προσπάθειες εφαρμογής της ναυτιλίας.
Filament Winding	Τεχνική για την παραγωγή κυλινδρικών και ελαφρών κωνικών υλικών με περιέλιξη ίνας υπό τάση.	6-7	Δοκιμασμένη μέθοδος στη ναυτιλία και σε άλλες βιομηχανίες για την κατασκευή κυρίως κυλινδρικών και κωνικών σχημάτων.
Pultrusion	Αυτοματοποιημένη διαδικασία δημιουργίας συνεχών σύνθετων υλικών σταθερής διατομής.	6-7	Ευρεία χρήση στη ναυτιλιακή και σε άλλες βιομηχανίες για την παραγωγή συνεχών προφίλ.
Laser and Electron-Beam Welding	Προηγμένες τεχνικές συγκόλλησης για την ένωση ελαφρών υλικών όπως αλουμίνιο και τιτάνιο.	6-7	Χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, αν και υπό ανάπτυξη για συγκεκριμένες ναυτιλιακές εφαρμογές.
Friction Stir Welding (FSW)	Διαδικασία σύνδεσης στερεάς κατάστασης που χρησιμοποιείται κυρίως για αλουμίνιο και μαλακά μέταλλα.	6-7	Καθιερωμένη χρήση σε βιομηχανικά πλαίσια, συμπεριλαμβανομένων των ναυτιλιακών εφαρμογών.
Automated Fiber Placement (AFP)	Ρομποτική τεχνική για την τοποθέτηση ινών υπό μορφή ταινιών σε καλούπια για τη κατασκευή σύνθετων υλικών.	5-6	Χρησιμοποιείται στην κατασκευή σύνθετων υλικών αεροδιαστημικής, διερευνάται όλο και περισσότερο για την εφαρμογή της στη ναυτιλία.
3D Printing/Additive Manufacturing	Επιλεκτική τήξη λέιζερ, τήξη δέσμης ηλεκτρονίων, μοντελοποίηση τηγμένης εναπόθεσης για μέταλλα και σύνθετα υλικά.	4-7	Πειραματικά στάδια ή στάδια δημιουργίας πρωτοτύπων για ορισμένες εφαρμογές. Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται σε πραγματικές συνθήκες.
Cold Forming of Metals	Διαμόρφωση μετάλλων σε θερμοκρασία δωματίου για διατήρηση της αντοχής και των ιδιοτήτων ελαφρών υλικών.	7	Καλά δοκιμασμένη μέθοδος σε διάφορους κλάδους, εφαρμόζεται και στη ναυτιλία.
Nano-Enhancement Techniques	Ενσωμάτωση νανοϋλικών σε σύνθετα υλικά ή επικαλύψεις για ενίσχυση ιδιοτήτων όπως αντοχή, μειωμένο βάρος κ.α.	3-4	Σχετικά νέο πεδίο εφαρμογών, σε μεγάλο βαθμό στη φάση έρευνας και ανάπτυξης για τη ναυτιλία

### 3.5 Επιστρώσεις Κύτους και μείωση των αερίων του θερμοκηπίου

Μεταξύ των στρατηγικών για την μείωση των αερίων θερμοκηπίου στη ναυτική βιομηχανία, οι προηγμένες τεχνολογίες επίστρωσης κύτους έχουν αναδειχθεί ως σημαντική τεχνική λύση. Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται τα χαρακτηριστικά των επιστρώσεων κύτους ως παράγοντες μείωσης των εκπομπών GHG. Οι επικαλύψεις κύτους δεν αποτελούν πλέον παθητικό στοιχείο του σχεδιασμού του πλοίου, αποτελούν σημαντικό και αναπόσπαστο συστατικό της καινοτόμων τεχνολογιών που θα αναδιαμορφώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ναυτιλίας. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των επιστρώσεων κύτους είναι:

- Μείωση της αντίστασης τριβής: Κεντρική θέση στη συμβολή των επικαλύψεων κύτους στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου είναι η ικανότητά τους να μετριάζουν την αντίσταση τριβής μεταξύ του κύτους ενός πλοίου και του περιβάλλοντος νερού. Όταν ένα πλοίο κινείται μέσα στο νερό, αντιμετωπίζει υδροδυναμική αντίσταση, η οποία απαιτεί σημαντική δαπάνη ενέργειας. Μια τραχιά ή ρυπασμένη επιφάνεια κύτους επιδεινώνει την αντίσταση, με αποτέλεσμα την υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Οι επιστρώσεις κύτους, ειδικά οι υδρόφοβες και οι αντιρρυπαντικές ποικιλίες, έχουν σχεδιαστεί για να δημιουργούν μια πιο λεία, πιο υδροδυναμικά αποδοτική επιφάνεια.
- Επιδράσεις εξομάλυνσης επιφανειών: Οι αντιρρυπαντικές επικαλύψεις, ειδικότερα, έχουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση μιας καθαρής και λείας επιφάνειας γάστρας. Αποτρέποντας την προσκόλληση και την ανάπτυξη οργανισμών όπως τα φύκια, τα όστρακα κ.α. Αυτές οι επικαλύψεις διασφαλίζουν ότι το κύτος του πλοίου διατηρεί τις επιφάνειες καθαρές με την πάροδο του χρόνου. Μελέτες στη θαλάσσια βιολογία και την επιστήμη των υλικών έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη προηγμένων αντιρρυπαντικών επικαλύψεων που όχι μόνο αποτρέπουν τους θαλάσσιους οργανισμούς αλλά και προσκολλώνται έντονα στο κύτος, εξασφαλίζοντας μακροχρόνια αποτελεσματικότητα. Με την ικανότητά τους να μειώνουν σημαντικά το λειτουργικό κόστος και τις εκπομπές GHG διατηρούν μια καθαρή επιφάνεια χαμηλής τριβής.
- Μείωση των Απαιτήσεων Ισχύος: Με την ελαχιστοποίηση της αντίστασης τριβής, οι επικαλύψεις του κύτους μειώνουν άμεσα την ισχύ που απαιτείται για την πρόωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, συμβάλλοντας στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου.

Συνοπτικά τα καθιερωμένα είδη επιστρώσεων κύτους είναι :

- Αντιρρυπαντικές επικαλύψεις: Οι αντιρρυπαντικές επικαλύψεις έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να εξουδετερώνουν τις επιβλαβείς επιπτώσεις της βιο-ρύπανσης (bio-fouling) στις επιφάνειες του κύτους του πλοίου, οι οποίες μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υδροδυναμική απόδοση και την κατανάλωση καυσίμου ενός σκάφους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων επικαλύψεων είναι:
  - Επιστρώσεις με βάση τον χαλκό: Εκμεταλλευόμενοι την απελευθέρωση ιόντων χαλκού στο νερό, αυτές οι επικαλύψεις δημιουργούν ένα εχθρικό περιβάλλον για ρυπαντικούς οργανισμούς.
  - Επιστρώσεις με βάση τη σιλικόνη: Αναγνωρισμένες για την λεία επιφάνεια τους και την ανάπτυξη συνθηκών χαμηλής τριβής, αυτές οι επικαλύψεις αποτρέπουν τη ρύπανση και απλοποιούν τις διαδικασίες καθαρισμού.
- Εποξειδικές επιστρώσεις: Οι εποξειδικές επικαλύψεις είναι η σημαντικότερη μέθοδος προστασίας από τη διάβρωση, και χρησιμοποιούνται συνήθως σε δεξαμενές έρματος και στο κύτος του πλοίου.
- Επιστρώσεις πολυουρεθάνης: Οι επιστρώσεις πολυουρεθάνης επιλέγονται για το γυαλιστερό φινίρισμά τους και την εξαιρετική τους αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία, καθιστώντας τις ιδανικές και για τις περιοχές κύτους πάνω από το νερό.
- Επιστρώσεις χωρίς βιοκτόνα: Με γνώμονα τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες, οι επιστρώσεις αυτές χωρίς βιοκτόνα επιδιώκουν τα αποτελέσματα των συμβατικών ειδών επιστρώσεων χωρίς αυξημένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις.

### 3.5.1 Κατάσταση πρακτικής στις επιστρώσεις κύτους

Το πεδίο των επιστρώσεων κύτους στη ναυτική βιομηχανία έχει υποστεί μια αξιοσημείωτη αλλαγή, λόγω σύγκλισης παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των εξελισσόμενων κανονισμών, της αυξημένης περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, των τεχνολογικών καινοτομιών και της διαρκούς αναζήτησης για βελτιωμένη λειτουργική απόδοση. Η κατάσταση της πρακτικής στις επιστρώσεις κύτους πλοίων αντικατοπτρίζει μια συντονισμένη προσπάθεια να επιτευχθεί μια λεπτή ισορροπία μεταξύ της κανονιστικής συμμόρφωσης, της περιβαλλοντικής ευθύνης και της επιδίωξης τεχνολογικών αιχμής.

- Κανονιστική Συμμόρφωση και Περιβαλλοντική Ευθύνη: Πρωταρχικό στοιχείο στο σημερινό τοπίο είναι το αυστηρό ρυθμιστικό πλαίσιο που διέπει τις θαλάσσιες δραστηριότητες. Οργανισμοί όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχουν πρωτοστατήσει στις προσπάθειες για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών

επιπτώσεων των πλοίων, με κανονισμούς όπως η Διεθνής Σύμβαση για τον Έλεγχο Επιβλαβών Αντιρρυπαντικών Συστημάτων στα Πλοία (Σύμβαση AFS) και ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Πλοίων (EEXI). Η συμμόρφωση με αυτούς τους οικολογικούς κανονισμούς έχει προκαλέσει μια σημαντική μεταστροφή προς τις φιλικές προς το περιβάλλον επιστρώσεις κύτους. Οι επιστρώσεις χωρίς βιοκτόνα και χαμηλής τοξικότητας, όπως οι επικαλύψεις απελευθέρωσης ρύπων σιλικόνης και οι λύσεις με βάση την υδρογέλη, κερδίζουν εξέχουσα θέση, αντανακλώντας τη δέσμευση της ναυτιλιακής βιομηχανίας για βιώσιμες πρακτικές. Η ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) οδήγησε επίσης στην έρευνα για επικαλύψεις που μειώνουν την αντίσταση, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση των καυσίμων (IMO, 2023).

- **Τεχνολογικές εξελίξεις:** Οι επικαλύψεις κύτους έχουν γνωρίσει μια τεχνολογική αναγέννηση, αποδίδοντας προϊόντα που είναι πιο ανθεκτικά, αποτελεσματικά και προσαρμόσιμα σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτές οι εξελίξεις συμβάλλουν σε εκτεταμένα διαστήματα που μπορούν οι επικαλύψεις να παραμένουν «στεγνές» και σε μειωμένα έξοδα συντήρησης. Οι αυτογουαλιζόμενες επικαλύψεις, εξοπλισμένες με μηχανισμούς ελεγχόμενης απελευθέρωσης βιοκτόνων, έχουν επίσης εφαρμοσθεί εκτεταμένα. Αυτές οι επικαλύψεις παρέχουν διαρκή αντιρρυπαντική προστασία ενώ ελαχιστοποιούν τις οικολογικές επιπτώσεις. Η ναυτοτεχνολογία και οι προηγμένες τεχνικές τροποποίησης επιφάνειας επέτρεψαν την ανάπτυξη υπερ-υδροφόβων επιστρώσεων και επικαλύψεων χαμηλής τριβής, μειώνοντας την υδροδυναμική αντίσταση και ενισχύοντας την απόδοση καυσίμου (Hirokazu Kaji, 2023).
- **Εστίαση στην μακροχρόνια απόδοση:** Οι πλοιοκτήτες και οι χειριστές συνεχίζουν να δίνουν προτεραιότητα στις επικαλύψεις κύτους που βελτιώνουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των πλοίων τους. Οι επιστρώσεις εποξειδικής και πολυουρεθάνης παραμένουν απαραίτητες για προστασία από τη διάβρωση σε κρίσιμες περιοχές όπως δεξαμενές έρματος και υποβρύχια κύτη. Αυτές οι επικαλύψεις είναι απαραίτητες για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας. Πάνω από την ίσαλο γραμμή, εφαρμόζονται επιστρώσεις πολυουρεθάνης υψηλής στυλπνότητας για τη διατήρηση της αισθητικής και την παροχή ανώτερης αντοχής στην υπεριώδη ακτινοβολία, συμβάλλοντας σε μακροχρόνια αποτελεσματικότητα (Jallal, 2021).
- **Έρευνα και Ανάπτυξη (Moore, 2023):** Η αδιάκοπη επιδίωξη της καινοτομίας τροφοδοτεί τις συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης. Επιστήμονες,



μηχανικοί και ειδικοί σε επιστρώσεις συνεργάζονται για νέα υλικά και τεχνολογίες για πιο αποτελεσματικές, φιλικές προς το περιβάλλον και ανθεκτικές επιστρώσεις κύτους. Η ενσωμάτωση συστημάτων συντήρησης με βάση τα δεδομένα προγνωστικών αναλύσεων και παρακολούθησης κατάστασης γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο των συνθηκών επίστρωσης, διευκολύνοντας τις προληπτικές στρατηγικές συντήρησης και ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας.

### 3.5.2 Προκλήσεις στις εφαρμογές επιστρώσεων κύτους

Μέσα στο δυναμικό περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών επιστρώσεως κύτους, αναδεικνύονται σημαντικές προκλήσεις και σημεία εστίασης για βελτίωση. Αυτές οι προκλήσεις, αν αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά θα μπορούν να συμβάλλουν στον σύγχρονο μετασχηματισμό της ναυτικής τεχνολογίας. Οι κυριότερες προκλήσεις που προκύπτουν από τις εφαρμογές επιστρώσεων κύτους είναι:

- Βιώσιμες και περιβαλλοντικά συμβατές επιστρώσεις: Η κλιμακούμενη ζήτηση για περιορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του ναυτιλιακού τομέα έχει προκαλέσει σημαντική πίεση για την ανάπτυξη επιστρώσεων χωρίς επιβλαβή βιοκτόνα, ενώ ταυτόχρονα την ανάγκη τήρησης αυστηρότερων περιβαλλοντικών κανονισμών σχετικά με τις περιεχόμενες ουσίες στα προϊόντα επικάλυψης. Είναι επιτακτική ανάγκη να αναληφθούν προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης για τη σύνθεση επικαλύψεων χωρίς βιοκτόνα που ενστερνίζονται την περιβαλλοντική ευθύνη και ταυτόχρονα αποδεικνύουν υψηλή αποτελεσματικότητα στην αντιμετώπιση των βιο-ρυπαντών στις επιφάνειες του πλοίου. Οι αρχές της πράσινης χημείας, σε συνδυασμό με τη συνετή προμήθεια βιώσιμων πρώτων υλών και την εφαρμογή φιλικών προς το περιβάλλον διαδικασιών παραγωγής, αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση σε αυτήν την προσπάθεια.
- Αποτελεσματικότητα επίστρωσης: Στο επίκεντρο της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω επικαλύψεων κύτους βρίσκεται η επιτακτική ανάγκη επίτευξης και διατήρησης υψηλών επιπέδων απόδοσης επίστρωσης. Αυτή η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από μια περίπλοκη αλληλεπίδραση παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας και της σύνθεσης των επικαλύψεων, της ακρίβειας στις τεχνικές εφαρμογής και των διαφοροποιημένων λειτουργικών προφίλ διαφορετικών πλοίων. Η διαρκής έρευνα και ανάπτυξη αποκτά μεγάλη σημασία. Η

βελτιστοποίηση των συνθέσεων επίστρωσης και οι επαναστατικές εξελίξεις στις μεθοδολογίες εφαρμογής είναι ζωτικής σημασίας. Η ικανότητα προσαρμογής των επικαλύψεων ώστε να ευθυγραμμίζονται με τα μοναδικά χαρακτηριστικά των πλοίων και τις λειτουργικές τους διαφοροποιήσεις είναι μία πρόκληση που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί.

- **Ανθεκτικότητα:** Το θαλάσσιο περιβάλλον, με τις διαβρωτικές του συνθήκες και τις μηχανικές καταπονήσεις, αποτελεί απειλή για την ανθεκτικότητα των επικαλύψεων του κύτους. Η πρόωρη υποβάθμιση όχι μόνο θέτει σε κίνδυνο τους στόχους μείωσης των εκπομπών GHG αλλά και εντείνει τις απαιτήσεις συντήρησης. Η αύξηση του χρόνου ζωής και της στιβαρότητας των επιστρώσεων είναι άμεση πρόκληση. Στο πλαίσιο αυτό η αναζήτηση νέων υλικών που παρουσιάζουν ιδιαίτερη αντοχή στη διάβρωση και τη φθορά είναι σημαντικό πεδίο έρευνας που έμμεσα θα διασφαλίζει το στόχο μείωσης GHG.
- **Σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και οικονομική βιωσιμότητα:** Η εισαγωγή προηγμένων επιστρώσεων συνεπάγεται αναπόφευκτα αρχικές δαπάνες κεφαλαίου. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων, συμπεριλαμβανομένων των πλοιοκτητών και των φορέων εκμετάλλευσης, πρέπει να αξιολογούν σχολαστικά τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και των στρατηγικών μείωσης των εκπομπών, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η αναμενόμενη εξοικονόμηση καυσίμων και οι μειωμένες δαπάνες συντήρησης. Η ανάπτυξη ισχυρών αναλύσεων κόστους-οφέλους και εξελιγμένων χρηματοοικονομικών μοντέλων είναι απαραίτητη. Αυτά τα εργαλεία εξουσιοδοτούν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων με μια ολοκληρωμένη κατανόηση της μακροπρόθεσμης οικονομικής βιωσιμότητας των επικαλύψεων που μειώνουν τις εκπομπές.
- **Λύσεις κλιμάκωσης για διαφορετικούς τύπους πλοίων:** Ο χώρος της ναυτιλίας χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο διαφόρων τύπων πλοίων, το καθένα με μοναδική λειτουργική δυναμική και με διαφορετικές ανάγκες επικάλυψης. Η προσαρμογή των επιστρώσεων που θα αποσκοπούν στην μείωση των εκπομπών GHG, για να καλύψουν αυτή την αξιοσημείωτη ποικιλομορφία αποτελεί μια περίπλοκη πρόκληση. Οι πρωτοβουλίες έρευνας και ανάπτυξης πρέπει να προσανατολιστούν για τη δημιουργία κλιμακούμενων επιστρώσεων ικανών να καλύψουν ολόκληρο το φάσμα των κατηγοριών πλοίων. Η ευελιξία στην προσαρμογή των επιστρώσεων και στην εφαρμογή ευέλικτων μεθόδων εφαρμογής είναι το κλειδί για την αποτελεσματική αντιμετώπιση.

### 3.5.3 Τεχνολογίες επικάλυψης που ανταποκρίνονται στις προκλήσεις

Η αξιοποίηση των επιστρώσεων κύτους ως βασικό εργαλείο στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου υποστηρίζεται από μία σειρά προηγμένων τεχνολογιών. Αυτές οι λύσεις προσφέρουν τη βάση για την κάλυψη των πολύπλευρων προκλήσεων που είναι συνδυασμένες με το μετασχηματιστικό εγχείρημα του ναυτιλιακού τομέα. Μία συνοπτική καταγραφή αυτών των τεχνολογιών περιλαμβάνει:

- Μοντελοποίηση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD): Η μοντελοποίηση CFD χρησιμοποιεί αλγόριθμους για την προσομοίωση της δυναμικής ροής ρευστού γύρω από το κύτος των πλοίων. Επιτρέπει περίπλοκη ανάλυση υδροδυναμικής και αντίστασης της οπισθέλκουσας. Διεξάγοντας ακριβείς προσομοιώσεις, η μοντελοποίηση CFD δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς να βελτιστοποιήσουν τα σχέδια επίστρωσης κύτους. Προβλέπεται πώς διαφορετικές συνθέσεις επίστρωσης, υφές και σχέδια θα επηρεάσουν την υδροδυναμική αντίσταση. Κατά συνέπεια, αυτή η τεχνολογία βοηθά στην ανάπτυξη επιστρώσεων υψηλής απόδοσης προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένους τύπους πλοίων. Επιπλέον, παρέχει πληροφορίες για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.
- Επιστρώσεις με βάση τη νανοτεχνολογία: Η νανοτεχνολογία εμβαθύνει στον χειρισμό των υλικών σε νανοκλίμακα. Οι νανοεπικαλύψεις ενσωματώνουν νανοσωματίδια σε παραδοσιακές συνθέσεις επίστρωσης. Οι νανοεπικαλύψεις έχουν τη δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στις επικαλύψεις κύτους ενισχύοντας ιδιότητες όπως η ομοιομορφία, η ανθεκτικότητα και η αντίσταση στους βιο-ρυπαντές. Τα νανοσωματίδια ελαχιστοποιούν την τραχύτητα της επιφάνειας, με αποτέλεσμα τη μειωμένη υδροδυναμική αντίσταση. Επιπλέον, προσδίδουν αξιοσημείωτη επέκταση στη διάρκεια ζωής της επίστρωσης. Η νανοτεχνολογία χρησιμεύει ως παράγοντας για την αντιμετώπιση προκλήσεων που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα της επίστρωσης, τη μακροζωία και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.
- Αντιρρυπαντικές ενώσεις χωρίς βιοκτόνα: Οι αντιρρυπαντικές επικαλύψεις χωρίς βιοκτόνα εισάγουν καινοτόμους μηχανισμούς για χημικά πρόσθετα ή μη τοξικές ενώσεις με σκοπό την αποτροπή βιο-ρύπανσης επιφανειών χωρίς να βασίζονται σε επιβλαβή βιοκτόνα. Αυτές οι πρωτοποριακές επικαλύψεις αντιμετωπίζουν τόσο τις περιβαλλοντικές ανησυχίες όσο και τις ρυθμιστικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση βιοκτόνων σε αντιρρυπαντικά διαλύματα. Αποτρέποντας τη βιο-ρύπανση χωρίς το οικολογικό αποτύπωμα των βιοκτόνων, ενισχύουν την απόδοση καυσίμου

και μειώνουν τις ανάγκες συντήρησης, συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση των εκπομπών. Οι αντιρρυπαντικές τεχνολογίες χωρίς βιοκτόνα αποτελούν την επιτομή των βιώσιμων, οικολογικών επικαλύψεων.

- Έξυπνες επιστρώσεις με παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο: Οι έξυπνες επιστρώσεις ενσωματώνουν αισθητήρες, μικροηλεκτρονικά και συστήματα παρακολούθησης στις συνθέσεις επίστρωσης. Αυτά τα συστήματα παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την απόδοση της επίστρωσης, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης οπισθέλκουσας και της αντίστασης βιο-ρύπανσης. Η εφαρμογή έξυπνων επιστρώσεων εγκαινιάζει μια νέα εποχή προληπτικής συντήρησης και βελτιστοποίησης απόδοσης. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στα πλοία να ανταποκρίνονται γρήγορα στις μεταβολές αποτελεσματικότητας της επίστρωσης, ελαχιστοποιώντας την υδροδυναμική αντίσταση και μεγιστοποιώντας την απόδοση καυσίμου. Η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών περιορίζει την πρόκληση της ανθεκτικότητας της επίστρωσης και παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για τις στρατηγικές μείωσης των εκπομπών.
- Συνεργατικές Πλατφόρμες Έρευνας και Ανάπτυξης: Οι ψηφιακές πλατφόρμες και τα συνεργατικά οικοσυστήματα παρέχουν έναν εικονικό χώρο για συνεργασία σε όλη τη βιομηχανία, κοινή χρήση έρευνας και καινοτομία στην ανάπτυξη επικαλύψεων. Οι συνεργατικές πλατφόρμες επιταχύνουν την ανταλλαγή γνώσεων, βέλτιστων πρακτικών και έρευνας αιχμής. Ενθαρρύνουν τη διαβιομηχανική συνεργασία, δίνοντας τη δυνατότητα στους ενδιαφερόμενους να αντιμετωπίσουν συλλογικά τις προκλήσεις. Οι πλατφόρμες χρησιμεύουν ως καταλύτες για την καινοτομία και τη συνεργασία σε παγκόσμια κλίμακα

#### 3.5.4 Καινοτόμες τεχνολογίες επικαλύψεων

Επιστρώσεις με βάση το γραφένιο (Graphene-based Coatings): Αυτές οι επικαλύψεις αξιοποιούν τις αξιοσημείωτες ιδιότητες του γραφενίου, μια εξαιρετικά ανθεκτική και σκληρή μορφή άνθρακα, εύκαμπτη και αγώγιμη. Σε θαλάσσιες εφαρμογές, οι επικαλύψεις με βάση το γραφένιο προσφέρουν ισχυρή ανθεκτικότητα, μειώνοντας σημαντικά τη φθορά στις επιφάνειες του κύτους. Η απόδοσή τους προέρχεται από τις εξαιρετικές υδρόφοβες ιδιότητες του υλικού, με αποτέλεσμα μειωμένη αντίσταση στο νερό και, κατά συνέπεια, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου.

Αυτολειαντικές αντιρρυπαντικές βαφές συμπολυμερούς (Self-polishing Copolymer Antifouling Paints): Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το FASTAR της Nippon Paint Marine, το οποίο ενσωματώνεται συνδυαστικά με ναυορητίνη. Αυτά οι βαφές έχουν σχεδιαστεί

για να παρέχουν ένα αποτέλεσμα αυτο-λείανσης, διατηρώντας μια λεία επιφάνεια κύτους με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η αυτο-λειαντική δράση μειώνει τη συσσώρευση θαλάσσιων οργανισμών, μειώνοντας έτσι την αντίσταση στο νερό και βελτιώνοντας την απόδοση καυσίμου. Τα συνδεδεμένα ναυπηγεία σε αυτές τις βαφές εξασφαλίζουν ελεγχόμενη απελευθέρωση αντιρρυπαντικών παραγόντων, διατηρώντας την αποτελεσματικότητά τους για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και μειώνοντας τη συχνότητα της επανεφαρμογής.

Wgrax® της WEG για Υπεράκτια Χρήση: Ειδικά σχεδιασμένο για υπεράκτια περιβάλλοντα, το Wgrax® έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε εξαιρετικά διαβρωτικές συνθήκες θάλασσας. Αυτό το καθιστά ιδανικό για την προστασία εξεδρών πετρελαίου, ανεμογεννητριών και άλλων υπεράκτιων κατασκευών. Η επιστροφή επεκτείνει τη διάρκεια ζωής αυτών των στοιχείων πολύ πέρα από αυτό που προσφέρουν οι παραδοσιακές επιστρώσεις, με αποτέλεσμα μειωμένο κόστος συντήρησης και βελτιωμένη ασφάλεια.

Σύστημα αυτόνομου καθαρισμού κύτους της Armach Robotics: Αυτό το σύστημα αντιπροσωπεύει ένα επαναστατικό βήμα στη συντήρηση του κύτους. Χρησιμοποιεί αυτόνομη ρομποτική για την αφαίρεση των βιο-ρυπαντών από το κύτος των πλοίων, μια διαδικασία που παραδοσιακά απαιτεί σημαντική ανθρώπινη εργασία. Αυτή η τεχνολογία όχι μόνο ενισχύει την απόδοση καυσίμου διατηρώντας ένα καθαρό κύτος, αλλά επίσης ελαχιστοποιεί την ανθρώπινη προσπάθεια και τους κινδύνους για την ασφάλεια που σχετίζονται με τον υποβρύχιο καθαρισμό.

Επιστρώσεις που σκληραίνουν με υπεριώδη ακτινοβολία: Αυτές οι επικαλύψεις σκληραίνουν χρησιμοποιώντας υπεριώδες φως, μια διαδικασία που είναι πολύ πιο γρήγορη από τις παραδοσιακές μεθόδους ξήρανσης. Αυτή η ταχεία σκλήρυνση μειώνει τους χρόνους εργασίας στα ναυπηγεία, μειώνοντας σημαντικά τις περιόδους συντήρησης. Επιπλέον, αυτές οι επικαλύψεις έχουν σχεδιαστεί για να έχουν χαμηλές εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), και έτσι ευθυγραμμίζονται με την αυξανόμενη ζήτηση για περιβαλλοντικά βιώσιμες βιομηχανικές πρακτικές.

Ελαφριές επιστρώσεις: Η εστίαση αυτών των επικαλύψεων είναι η μείωση του συνολικού βάρους του σκάφους. Τα ελαφρύτερα σκάφη έχουν χαμηλότερο βύθισμα, πράγμα που μεταφράζεται σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και, κατά συνέπεια, χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Αυτές οι επικαλύψεις είναι ιδιαίτερα ωφέλιμες για σκάφη υψηλής ταχύτητας και πλοία όπου το βάρος παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση και την αποδοτικότητα.

### 3.5.5 Επίπεδο ετοιμότητας τεχνολογίας (TRL) καινοτόμων τεχνολογιών επικάλυψης

Για τις επικαλύψεις με βάση το γραφένιο, οι πρόσφατες εφαρμογές δείχνουν μια σημαντική υπόσχεση, με αξιοσημείωτο παράδειγμα τη Stolt Tankers που εφαρμόζει μια επίστρωση με βάση το γραφένιο στο κύτος ενός πλοίου, η οποία αναμένεται να διαρκέσει περίπου δέκα χρόνια. Αυτό υποδηλώνει ένα σχετικά προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης. Ωστόσο, η ευρύτερη αγορά προϊόντων που βασίζονται σε δισδιάστατα υλικά, συμπεριλαμβανομένου του γραφενίου, εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως η έλλειψη τυποποίησης και αξιοπιστίας ποιότητας, γεγονός που δείχνει ότι αυτές οι τεχνολογίες δεν είναι ακόμη πλήρως ώριμες ή τυποποιημένες στη βιομηχανία. Η επένδυση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στην Πειραματική Πιλοτική Γραμμή GF 2D στοχεύει στην προώθηση της εκβιομηχάνισης αυτών των υλικών, με TRL (Επίπεδα ετοιμότητας τεχνολογίας) που κυμαίνονται από 7 έως 8 για αυτά τα έργα, που σηματοδοτούν μια μετάβαση από το πρωτότυπο στο επιχειρησιακό περιβάλλον (Nature Materials, 2021) (Graphene-info, 2023).

Τα αυτολειαντικά αντιρυπαντικά συμπολυμερούς έχουν εξελιχθεί σημαντικά μετά την προτεινόμενη απαγόρευση του τριβουτυλοκασιτέρου, με νέες συνθέσεις που στοχεύουν στην παροχή συγκρίσιμης απόδοσης με χαμηλότερο κόστος και χωρίς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η βασική πρόοδος σε αυτές τις επιστρώσεις είναι η χρήση πολυμερών ακρυλικού σιλυλίου, τα οποία επιτρέπουν την ελεγχόμενη διάβρωση και τη συνεπή απελευθέρωση βιοκτόνων. Αυτή η τεχνολογία, που εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 2004, επιδεικνύει υψηλό βαθμό ανάπτυξης και προτείνεται υψηλό TRL, πιθανόν στο φάσμα της λειτουργικής χρήσης και βελτιστοποίησης (Paint Coatings Industry, 2006).

Οι επιστρώσεις με βάση τη σιλικόνη για το κύτος των πλοίων έχουν μελετηθεί για τη δυνατότητά τους ως φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές λύσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές επικαλύψεις με βάση τον χαλκό. Αυτές οι επικαλύψεις έχουν αποδειχθεί πολλά υποσχόμενες για τη μείωση της βιο-ρύπανσης στο κύτος των πλοίων, ενώ ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι επικαλύψεις με βάση τη σιλικόνη (FRCs) έχουν βρεθεί ότι είναι πολύ λιγότερο τοξικές από τις επιστρώσεις με βάση τον χαλκό και πρόσφατες μελέτες έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους στην πρόληψη της συσσώρευσης οστράκων.

Όσον αφορά το Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL), οι επιστρώσεις με βάση τη σιλικόνη φαίνεται να βρίσκονται σε υψηλό επίπεδο, υποδεικνύοντας την ετοιμότητά τους για λειτουργική χρήση και βελτιστοποίηση. Αυτό αποδεικνύεται από την επιτυχημένη εφαρμογή τους σε διάφορα θαλάσσια περιβάλλοντα και το αυξανόμενο ενδιαφέρον από τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Το επίπεδο ετοιμότητας τεχνολογίας (TRL) για την επίστρωση WrapX® της WEG μπορεί να συναχθεί από τις διαθέσιμες πληροφορίες. Το WrapX® περιγράφεται πως βρίσκεται σε προχωρημένα στάδια δοκιμών και εφαρμογής, κυρίως σε υπεράκτιες πλατφόρμες. Αυτό δείχνει ότι η τεχνολογία έχει υποστεί σημαντική ανάπτυξη, συμπεριλαμβανομένης της έρευνας, των επενδύσεων και των πραγματικών δοκιμών. Το γεγονός ότι εφαρμόζεται ήδη σε λειτουργικά περιβάλλοντα υποδηλώνει υψηλότερο TRL.

Συνήθως, TRL 7 ή παραπάνω υποδηλώνει ότι ένα πρωτότυπο τεχνολογίας έχει επιδειχθεί σε λειτουργικό περιβάλλον. Δεδομένης της περιγραφής του WrapX® ότι δοκιμάζεται και χρησιμοποιείται σε υπεράκτιες πλατφόρμες, είναι πιθανό να βρίσκεται σε TRL 7 ή υψηλότερο. Αυτό το επίπεδο σημαίνει ότι η τεχνολογία έχει προχωρήσει πέρα από τη φάση του πρωτοτύπου και βελτιώνεται για τακτική λειτουργική χρήση.

Ωστόσο, χωρίς ρητές δηλώσεις στις πηγές σχετικά με το ακριβές TRL, αυτή η αξιολόγηση παραμένει μια τεκμηριωμένη εκτίμηση με βάση το περιγραφόμενο στάδιο ανάπτυξης και εφαρμογής.

Το Autonomous Hull Cleaning System της Armach Robotics, γνωστό ως EverClean, αντιπροσωπεύει μια σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία συντήρησης κύτους. Αυτό το σύστημα είναι το πρώτο του είδους του που προσφέρει συνδρομή ρομποτικής ως υπηρεσία για τον καθαρισμό του κύτους του πλοίου. Τα ρομπότ EverClean εκτελούν εργασίες καθαρισμού με ακρίβεια, γεγονός που οδηγεί σε ελάχιστη επανάληψη και αποτελεσματική συλλογή δεδομένων, παρέχοντας εκτενείς αναφορές κατάστασης του κύτους μετά από κάθε επισκευή. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί μια σταθερά καθαρή επιφάνεια κύτους, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως εξοικονόμηση καυσίμου, μείωση εκπομπών άνθρακα και ελαχιστοποιημένα διαστήματα συντήρησης μέσω σχεδιασμού που βασίζεται σε τεχνητή νοημοσύνη (Greensea IQ, 2023).

Η τεχνολογία βρίσκεται υπό συνεχή ανάπτυξη, με βασικά ορόσημα να έχουν επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια. Το Γραφείο Ναυτικής Έρευνας του Ναυτικού των ΗΠΑ ανέθεσε στην Greensea Systems Inc., μια σύμβαση για τη συνέχιση της ανάπτυξης αυτού του αυτόνομου οχήματος καθαρισμού κύτους. Αυτό αποτελεί μέρος ενός συνεχιζόμενου προγράμματος μεταφοράς τεχνολογίας μικρών επιχειρήσεων (STTR) που ξεκίνησε το 2018. Μια κρίσιμη πτυχή του προγράμματος STTR καταδεικνύει την εμπορική βιωσιμότητα της τεχνολογίας, η οποία έχει αποτελέσει το επίκεντρο της Greensea σε συνεργασία με την Armach Robotics. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί ένα νέο, σχετικό με το κύτος σύστημα εντοπισμού θέσης που επιτρέπει την ακριβή πλοήγηση και τον έλεγχο, ενισχύοντας την αυτονομία και την αποτελεσματικότητά του (Defense Advancement, 2022).

Πρόσφατα, η Armach Robotics διεξήγαγε με επιτυχία μια δοκιμή του ρομπότ της Hull Service, σηματοδοτώντας ένα σημαντικό προόδου και ανάπτυξης. Αυτή η δοκιμή έδειξε την ικανότητα του ρομπότ να λειτουργεί από απόσταση και να εκτελεί αποτελεσματικές εργασίες καθαρισμού. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ένα νέο επίπεδο «Hull Intelligence», δημιουργώντας μια έρευνα κατάστασης του κύτους κάθε φορά που το καθαρίζει, η οποία βοηθά τους πλοιοκτήτες να κατανοούν την κατάσταση του κύτους τους σε πραγματικό χρόνο και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις συντήρησης. Η μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος περιλαμβάνει ρομποτικά συστήματα μικρού μήκους ικανά για αυτόνομη εκτόξευση, καθαρισμό και ανάκτηση ενώ επιτηρούνται εξ αποστάσεως.

Όσον αφορά το Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL), η συνεχής ανάπτυξη, οι επιτυχημένες δοκιμές και οι τρέχουσες επιχειρησιακές δυνατότητες του συστήματος υποδηλώνουν ότι βρίσκεται στα υψηλότερα επίπεδα της κλίμακας TRL. Αυτό υποδηλώνει μια μετάβαση από το πρωτότυπο στο λειτουργικό περιβάλλον, όπου η τεχνολογία όχι μόνο αναπτύσσεται αλλά και ενσωματώνεται σε εφαρμογές του πραγματικού κόσμου. Ωστόσο, χωρίς ρητές δηλώσεις σχετικά με το ακριβές TRL του, αυτή παραμένει μια εκτίμηση που βασίζεται στο τρέχον στάδιο ανάπτυξης και εφαρμογής (Ocean Robotics Planet, 2022) (MarineLink, 2022).

Οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τις σκληρυμένων με υπεριώδη ακτινοβολία επιστρώσεις στο συγκεκριμένο πλαίσιο των επικαλύψεων κύτους είναι περιορισμένες. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις ευρύτερες εφαρμογές των σκληρυμένων με υπεριώδη ακτινοβολία επικαλύψεων σε διάφορες βιομηχανίες και τις μοναδικές ιδιότητές τους, μπορούμε να συμπεράνουμε την πιθανή χρησιμότητά τους σε εφαρμογές επίστρωσης κύτους.

Οι επιστρώσεις που σκληραίνουν με υπεριώδη ακτινοβολία είναι γνωστές για την ταχεία σκλήρυνση, τη φιλικότητα προς το περιβάλλον λόγω των χαμηλών εκπομπών VOC και την ανθεκτικότητά τους. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν άμεσες πληροφορίες για το τρέχον Επίπεδο Ετοιμότητας Τεχνολογίας (TRL) των σκληρυμένων με υπεριώδη ακτινοβολία επικαλύψεων ειδικά για εφαρμογές κύτους, είναι δύσκολο να τοποθετηθούν με ακρίβεια στην κλίμακα TRL σε αυτό το πλαίσιο. Είναι εδραιωμένες σε άλλες βιομηχανίες, υποδεικνύοντας υψηλό TRL, αλλά η προσαρμογή τους στις θαλάσσιες επικαλύψεις κύτους μπορεί να βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης ή πειραμάτων.

Η ανάπτυξη ελαφρών επιστρώσεων για το κύτος των πλοίων είναι ένας τομέας ενεργού έρευνας και καινοτομίας, που επικεντρώνεται στη βελτίωση της απόδοσης των πλοίων και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Μια αξιοσημείωτη πρόοδος σε αυτόν τον τομέα είναι η



εισαγωγή νέων τεχνολογιών αντιρρύπανσης, όπως το FASTAR της Nippon Paint Marine, το οποίο είναι ένα λειαντικό αντιρρυπαντικό με μοναδική δομή ρητίνης ναυτεχνολογίας. Το FASTAR είναι αξιολογημένο για την ικανότητά του να ελέγχει την έκλυση βιοκτόνων, προσφέροντας αντιρρυπαντικά συστήματα επιφανειών υψηλής απόδοσης (Coatings Pro, 2022).

Με βάση το τρέχον επίπεδο καινοτομίας και εφαρμογής στο πεδίο, φαίνεται ότι οι ελαφριές επιστρώσεις προχωρούν προς υψηλότερα επίπεδα ετοιμότητας τεχνολογίας (TRLs), πιθανότατα γύρω στα TRL 6 έως 7. Αυτή η εκτίμηση υποδηλώνει ότι αυτές οι τεχνολογίες μεταβαίνουν από την επίδειξη πρωτοτύπων σε ένα σχετικό περιβάλλον στην επίδειξη πρωτοτύπου συστήματος σε ένα λειτουργικό περιβάλλον. Ωστόσο, η περαιτέρω ανάπτυξη και δοκιμές στις θαλάσσιες συνθήκες είναι απαραίτητες για την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητάς τους και την ευρύτερη υιοθέτησή τους από τη βιομηχανία.

Πίνακας 6: Τεχνολογίες επίστρωσης κύτους πλοίων και εκτίμηση τεχνολογικής ωριμότητας

Τεχνολογία	Περιγραφή	Εκτίμηση TRL	Αιτιολόγηση
Graphene-based Coatings	Προηγμένες επιστρώσεις που ενσωματώνουν γραφένιο, γνωστές για εξαιρετική αντοχή και αγωγιμότητα.	7-8	Προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, μετάβαση στο λειτουργικό περιβάλλον.
Self-polishing Copolymer Antifouling Paints	Αντιρρυπαντικές επιστρώσεις που απελευθερώνουν σταδιακά βιοκτόνο, διατηρώντας καθαρές τις επιφάνειες	7-9	Χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυτιλιακή βιομηχανία.
Eco-friendly Silicon-based Coatings	Βιώσιμες επικαλύψεις που χρησιμοποιούν σιλικόνη για λιγότερη τοξικότητα και αποτελεσματική πρόληψη ρύπανσης.	7-9	Αυξανόμενη υιοθέτηση στη ναυτιλιακή βιομηχανία.
WEG's WrapX® for Offshore Use	Πρωτοποριακή επίστρωση για διαβρωτικά περιβάλλοντα, που ενισχύει τη διάρκεια ζωής του στοιχείου σε υπεράκτιες καταστάσεις.	7-9	Σε φάση δοκιμής και εφαρμογής σε υπεράκτιες πλατφόρμες, υποδεικνύοντας την ολοκλήρωση σε λειτουργικό περιβάλλον.
Armach Robotics' Autonomous Hull Cleaning System	Ρομποτικό σύστημα για προληπτικό καθαρισμό του κύτους με ακρίβεια. Προσφέρει εκτός από συντήρηση και συλλογή δεδομένων κατάστασης.	7-8	Σε προηγμένη φάση δοκιμών και εφαρμογών με αποδεδειγμένες δυνατότητες.
UV-Curable Coatings	Επιστρώσεις που σκληραίνουν γρήγορα κάτω από UV. Αποτελεσματικότητα και φιλικότητα προς το περιβάλλον.	4-6	Εφαρμόστηκε σε διάφορες βιομηχανίες, αλλά η προσαρμογή στις εφαρμογές κύτους μπορεί να βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη.
Lightweight Coatings	Καινοτόμες επιστρώσεις κύτους που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης του πλοίου και στη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.	6-7	Προχωρημένη τεχνολογία με ενσωμάτωση στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

### 3.5.6 Μελέτη Περίπτωσης

Η Stolt Tankers έγινε η πρώτη ναυτιλιακή εταιρεία στον κόσμο που εφαρμόζει επίστρωση με βάση το γραφένιο στο κύτος ενός από τα χημικά δεξαμενόπλοιά της, του Stolt Lotus. Αυτή η καινοτόμος τεχνολογία, που αναπτύχθηκε από την Graphite Innovation & Technologies (GIT) Coatings, είναι γνωστή ως γραφένιο X-GIT FUEL. Είναι μια σκληρή επίστρωση που δημιουργεί επιφάνεια εξαιρετικά χαμηλής τριβής στο πλοίο, βελτιώνοντας την απόδοσή του. Αυτή η επίστρωση είναι απαλλαγμένη από βιοκτόνα, έλαια πυριτίου ή τοξικά συστατικά και αναμένεται να διαρκέσει για περίπου δέκα χρόνια. Μια αξιολόγηση στην πενταετία θα καθορίσει εάν χρειάζεται συντήρηση. Η τεχνολογία γραφενίου X-GIT FUEL καταδεικνύει δυνατότητες μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με την αναμενόμενη εξοικονόμηση καυσίμου να κυμαίνεται μεταξύ 5-7%. Αυτή η μείωση επιτυγχάνεται με τη μείωση της τριβής μεταξύ του κύτους και του νερού και την μείωση της βιο-ρύπανσης καθώς το πλοίο ταξιδεύει. Αυτή η εφαρμογή βασίζεται στην

προηγούμενη εργασία της Stolt Tankers με την GIT Coatings, όπου εφάρμοσαν επίστρωση γραφενίου στους έλικες περισσότερων από 40 πλοίων.

Δεδομένου ότι η Stolt Tankers έχει ήδη εφαρμόσει αυτήν την επίστρωση γραφενίου στο κύτος ενός από τα χημικά δεξαμενόπλοιά της και έχει εφαρμόσει στο παρελθόν παρόμοια επίστρωση γραφενίου στους έλικες περισσότερων από 40 πλοίων, υποδηλώνει ότι η τεχνολογία είναι πέρα από τις πειραματικές ή πρωτότυπες φάσεις. Η εφαρμογή αυτής της επίστρωσης σε ένα πραγματικό λειτουργικό περιβάλλον, όπως η εμπορική ναυτιλία, δείχνει ότι η τεχνολογία βρίσκεται σε σχετικά υψηλό TRL.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες, η τεχνολογία επίστρωσης κύτους γραφενίου X-GIT FUEL θα είναι πιθανότατα στα TRL 7 ή 8. Το TRL 7 αντιστοιχεί σε μια επίδειξη πρωτοτύπου συστήματος σε λειτουργικό περιβάλλον, ενώ το TRL 8 σχετίζεται με τεχνολογία που έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί σε τελική μορφή και υπό αναμενόμενες συνθήκες. Δεδομένου ότι η τεχνολογία χρησιμοποιείται ενεργά σε εμπορικά πλοία και έχει αποδείξει την αποτελεσματικότητά της στη βελτίωση της απόδοσης των καυσίμων και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ευθυγραμμίζεται καλά με αυτά τα υψηλότερα επίπεδα της κλίμακας TRL.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πρόκειται για μια εκτίμηση που βασίζεται σε διαθέσιμες δημόσιες πληροφορίες και το πραγματικό TRL μπορεί να ποικίλλει με βάση πιο λεπτομερείς, αποκλειστικές πληροφορίες σχετικά με τα στάδια ανάπτυξης της τεχνολογίας.



Εικόνα 30: Εργασίες επίστρωσης στο πλοίο Stolt Lotus

### 3.6 Παρατηρήσεις-Σχολιασμός

Η τεχνική ακρίβεια και η πρακτική βιωσιμότητα είναι πρωταρχικής σημασίας στις καινοτόμες τεχνολογίες στη ναυτιλία. Η κριτική εξέταση των ελαφρών υλικών, της λίπανσης αέρα, της βελτιστοποίησης του σχήματος του κύτους και του μεγέθους του πλοίου ως προς τη συνεισφορά τους στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία αποτελεί πολύπλευρη πρόκληση. Ταξινομώντας ανά περίπτωση θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τις εξής παρατηρήσεις:

- **Ελαφριά υλικά:** Από μηχανικής άποψης, η μετάβαση προς ελαφριά υλικά όπως τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRP) είναι ένα βήμα προς την καινοτομία στη ναυπηγική βιομηχανία. Ωστόσο, η πρόκληση έγκειται στην ισορροπία μεταξύ των πιθανών περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων τους και της πρακτικής τους εφαρμογής. Η ενεργοβόρα διαδικασία παραγωγής και ο αντίκτυπος στον κύκλο ζωής, αυτών των υλικών, είναι κρίσιμες πτυχές που πρέπει να σταθμιστούν σε σχέση με τα λειτουργικά οφέλη. Επιπλέον, ο δισταγμός της ναυτιλιακής βιομηχανίας να στραφεί από τα παραδοσιακά υλικά σε νεότερες εναλλακτικές, εγείρει ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Έτσι, ενώ οι δυνατότητες των ελαφρών υλικών είναι υπαρκτές, η εφαρμογή τους απαιτεί την υπέρβαση σημαντικών τεχνικών, οικονομικών και ρυθμιστικών εμποδίων.
- **Τεχνολογία λίπανσης αέρα:** Η λίπανση αέρα αποτελεί μια τεχνολογικά προηγμένη μέθοδο μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά της ποικίλλει ανάλογα με τους διαφορετικούς τύπους πλοίων και τις συνθήκες της θάλασσας. Η υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας στον υπάρχοντα στόλο θέτει ερωτηματικά που σχετίζονται με το κόστος μετασκευής, τη μακροπρόθεσμη συντήρηση και την ενοποίηση με τα υπάρχοντα συστήματα. Από μηχανολογική άποψη, ενώ τα αρχικά αποτελέσματα είναι πολλά υποσχόμενα, η επεκτασιμότητα και η προσαρμοστικότητα της τεχνολογίας σε διαφορετικά θαλάσσια περιβάλλοντα χρειάζεται επιπλέον δοκιμές και επικύρωση. Ο ναυτιλιακός κλάδος θα απαιτήσει ισχυρά, μακροπρόθεσμα δεδομένα για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της βιωσιμότητας και της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας των συστημάτων λίπανσης αέρα.
- **Βελτιστοποίηση σχήματος κύτους:** Η βελτιστοποίηση του σχήματος της γάστρας για την αύξηση της απόδοσης είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μηχανικής καινοτομίας. Τα θεωρητικά μοντέλα δείχνουν σημαντικές δυνατότητες για εξοικονόμηση καυσίμου, αλλά η εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες πρέπει να

λάβει υπόψη παράγοντες όπως η χωρητικότητα φορτίου, η ευστάθεια του πλοίου και οι περιορισμοί κατασκευής. Η πρόκληση είναι να σχεδιαστεί ένα κύτος που δεν θα είναι μόνο υδροδυναμικά αποδοτικό, αλλά θα καλύπτει και τις πολύπλευρες επιχειρησιακές ανάγκες των πλοίων. Επιπλέον, οι δυνατότητες μετασκευής των υπαρχόντων πλοίων είναι περιορισμένες, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα οφέλη από τη βελτιστοποίηση του σχήματος του κύτους είναι πιο πιθανό να υλοποιηθούν σε νέα σχέδια πλοίων.

- Μέγεθος σκάφους: Η συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους του πλοίου και των εκπομπών είναι ένα σύνθετο ζήτημα που απαιτεί μια λεπτομερή κατανόηση. Τα μεγαλύτερα πλοία επιτυγχάνουν μεγαλύτερη απόδοση καυσίμου ανά μονάδα φορτίου, αλλά αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί από υψηλότερες συνολικές εκπομπές και αυξημένες επιχειρησιακές προκλήσεις. Από μηχανική άποψη, ο σχεδιασμός μεγαλύτερων πλοίων για αποτελεσματικότερη λειτουργία πρέπει να εξισορροπείται με τους περιορισμούς της λιμενικής υποδομής, τους αυξημένους χρόνους ελλιμενισμού και τη διαχείριση του εφοδιασμού. Επιπλέον, επιχειρησιακές στρατηγικές όπως οι χαμηλές ταχύτητες, που μειώνουν τις εκπομπές, αλλά μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένους χρόνους διέλευσης και στην ανάγκη για περισσότερα πλοία, αντισταθμίζοντας ενδεχομένως τα περιβαλλοντικά οφέλη.

Κατά τη σύνθεση αυτών των παρατηρήσεων, γίνεται σαφές ότι η πορεία προς τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον ναυτιλιακό τομέα μέσω της καινοτομίας στα υλικά και στο σχεδιασμό του πλοίου αποτελεί μια σύνθετη κατάσταση. Περιλαμβάνει μια δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ της τεχνολογικής καινοτομίας, της οικονομικής σκοπιμότητας και της διατήρησης της λειτουργικότητας. Οι μηχανικές προκλήσεις για την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών είναι σημαντικές και απαιτούν μια ολιστική προσέγγιση. Αυτή η προσέγγιση θα πρέπει να περιλαμβάνει συνεχή έρευνα και ανάπτυξη, συνεργασία σε ολόκληρη τη βιομηχανία και ένα προσαρμοστικό ρυθμιστικό πλαίσιο που προωθεί την καινοτομία διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια και την προστασία του περιβάλλοντος.

Οι μελλοντικές εξελίξεις σε αυτές τις τεχνολογίες προτείνεται να βασίζονται σε αυστηρά εμπειρικά δεδομένα και σε πραγματικές δοκιμές. Η ναυτιλιακή βιομηχανία καλείται να εφαρμόσει την «κουλτούρα καινοτομίας», όπου τα νέα υλικά, τεχνολογίες και σχέδια όχι μόνο σχεδιάζονται αλλά αξιολογούνται σχολαστικά και βελτιώνονται διαρκώς. Αυτό απαιτεί εκτός από επενδύσεις στην έρευνα, και προθυμία να επανεξεταστούν οι παραδοσιακές πρακτικές εστιάζοντας στην βελτίωση ή αλλαγή τους.

### Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

#### 4.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη ναυτιλία

Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι μια πολύπλευρη προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει τεχνολογίες όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια και οι κυψέλες καυσίμου. Κάθε μία από αυτές τις πηγές έχει μοναδικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις.

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (PV) πάνελ. Αυτά τα πάνελ συνήθως τοποθετούνται στο κατάστρωμα του πλοίου, μετατρέποντας το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορα συστήματα επί του πλοίου ή να βοηθήσει στην πρόωσή του. Τα κύρια πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας είναι η ευρεία διαθεσιμότητά της και η σχετική απλότητα της τεχνολογίας. Ωστόσο, οι προκλήσεις περιλαμβάνουν την περιορισμένη επιφάνεια που είναι διαθέσιμη για εγκατάσταση πάνελ και τη μεταβλητότητα της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω των καιρικών συνθηκών και της κίνησης του πλοίου. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, τα πλοία χρησιμοποιούν συχνά προηγμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και έξυπνα συστήματα διαχείρισης για τη βελτιστοποίηση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας (IRENA, 2015).

Η αιολική ενέργεια, μια παραδοσιακή θαλάσσια πηγή ενέργειας, τα τελευταία χρόνια αναβιώνει με σύγχρονες τεχνολογίες όπως άκαμπτα πανιά, αεριοωθούμενα πανιά και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση πρόωση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια είναι ιδιαίτερα ελκυστική λόγω της αφθονίας της στη θάλασσα. Ωστόσο, η ενσωμάτωσή της σε πλοία απαιτεί προσεκτικές σχεδιαστικές εκτιμήσεις, καθώς μπορεί να επηρεάσει την αεροδυναμική και τη σταθερότητα. Η απόδοση των συστημάτων αιολικής ενέργειας εξαρτάται επίσης από τον καιρό και τη διαδρομή του πλοίου.

Οι κυψέλες καυσίμου στις ναυτιλιακές εφαρμογές προσφέρουν μια καθαρότερη εναλλακτική λύση σε σχέση με τους παραδοσιακούς κινητήρες εσωτερικής καύσης. Μετατρέπουν τη χημική ενέργεια από τα καύσιμα, ιδιαίτερα το υδρογόνο, σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου περιλαμβάνουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και χαμηλότερες εκπομπές ρύπων. Οι προκλήσεις περιλαμβάνουν την ανάγκη για υποδομή για την παραγωγή, αποθήκευση και διανομή

υδρογόνου και την πολυπλοκότητα της ενσωμάτωσης συστημάτων κυψελών καυσίμου στα υπάρχοντα συστήματα ισχύος του πλοίου.

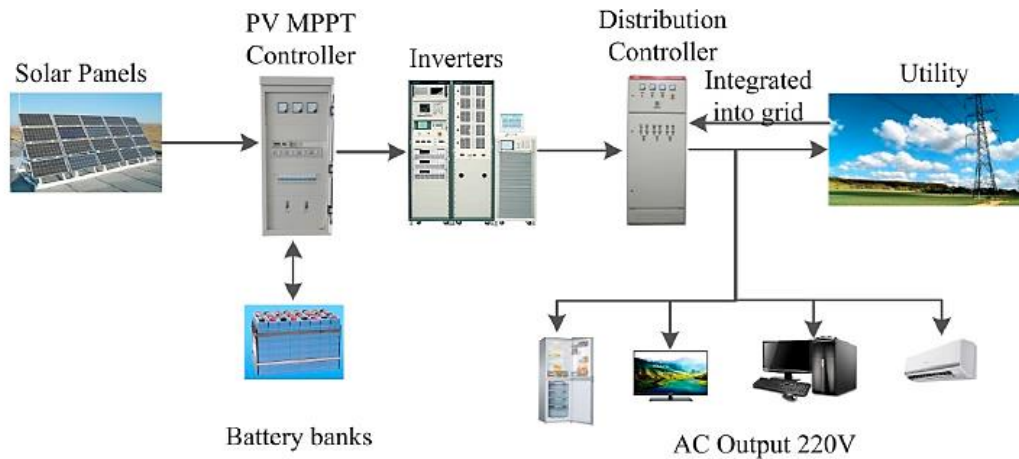
Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη ναυτιλία παρουσιάζει προκλήσεις όπως τεχνολογικούς περιορισμούς, απαιτήσεις υποδομής και οικονομικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του υψηλότερου αρχικού κόστους και της ανάγκης για θέσπιση ρυθμιστικών πλαισίων. Ωστόσο, τα μακροπρόθεσμα οφέλη, όπως οι μειωμένες εκπομπές, το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και η μειωμένη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, αποτελούν σημαντικούς μοχλούς αυτής της μετάβασης. Η κίνηση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη ναυτιλία πιθανότατα θα περιλαμβάνει συνδυασμό τεχνολογιών και προσεγγίσεων, που απαιτούν τεχνολογική καινοτομία, υποστηρικτικές πολιτικές και διεθνή συνεργασία.

Η στροφή του ναυτιλιακού τομέα προς αυτές αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης παγκόσμιας προσπάθειας για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης και απαλλαγής από τον άνθρακα. Η μετάβαση κρίνεται μια σύνθετη διαδικασία που θα επηρεάσει σημαντικά το παγκόσμιο εμπόριο και τις μεταφορές τα επόμενα χρόνια (The Maritime Executive, 2021).

## 4.2 Ηλιακή Ενέργεια

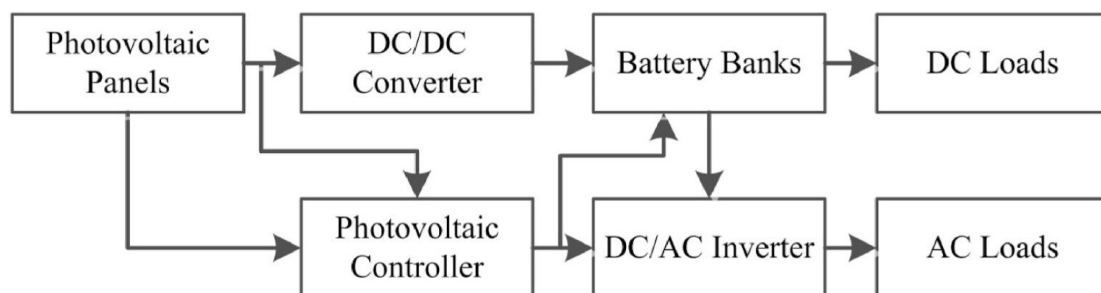
Η ηλιακή ενέργεια είναι το είδος ενέργειας που βρίσκεται σε απεριόριστη αφθονία, είναι μη ρυπογόνος και ελεύθερα διαθέσιμη. Οι κύριοι μηχανισμοί για την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας είναι μέσω φωτοβολταϊκών (PV) και της ηλιακής θερμικής μετατροπής (Koberle, et al., 2015) (Bostan, et al., 2013) (Kurtz, 2011). Σημαντικές έρευνες στον τομέα αυτό, εστιάζουν σε διάφορες μεθόδους μετατροπής της ηλιακής ενέργειας και στις εφαρμογές της.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών γνώρισε ταχεία ανάπτυξη λόγω βελτιώσεων στην απόδοση μετατροπής των φωτοβολταϊκών κελιών. Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής Φ/Β, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 30, χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος ΦΒ (Maximum Power Point Tracking, MPPT) για μεγιστοποίηση της απόδοσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ελεγκτές διανομής διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Φ/Β στο δίκτυο, μια διαδικασία που απαιτεί μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος από DC σε AC (Mekhilef, et al., 2011) (Piciu, et al., 2014).



Εικόνα 31: Δομή ενός τυπικού συστήματος παραγωγής Φ/Β

Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι λειτουργίας για συστήματα παραγωγής φωτοβολταϊκών: η αυτόνομη και η συνδεδεμένη σε δίκτυο. Τα αυτόνομα συστήματα, που απεικονίζονται στην Εικόνα 31, λειτουργούν ανεξάρτητα από το κύριο δίκτυο. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα να ανταποκρίνονται στις ενεργειακές απαιτήσεις των φορτίων τους και χαρακτηρίζονται από απλούστερο έλεγχο και λειτουργία λόγω της απομόνωσής τους από το κύριο δίκτυο. Ωστόσο, βασίζονται σε τράπεζες μπαταρίας (Power bank) για την παροχή ενέργειας όταν η παραγωγή υπολείπεται, οδηγώντας δυνητικά σε υψηλότερο κόστος εγκατάστασης.

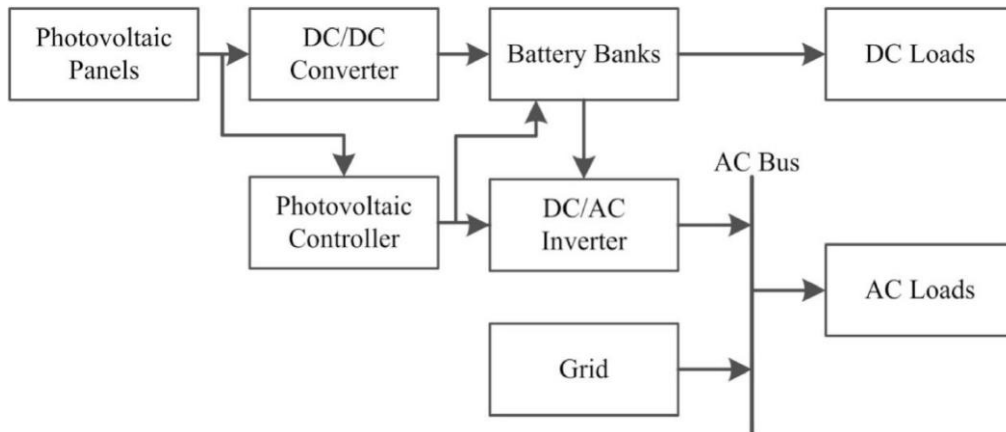


Εικόνα 32: Το διάγραμμα λειτουργίας ενός τυπικού αυτόνομου συστήματος παραγωγής Φ/Β.

Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συνδεδεμένων στο δίκτυο, που φαίνονται στην Εικόνα 32, είναι ενσωματωμένα στο κύριο δίκτυο. Αυτή η ενοποίηση βοηθά στην αντιμετώπιση των προκλήσεων δυναμικής ισορροπίας ισχύος και ενέργειας που είναι εγγενείς σε αυτόνομα συστήματα (Mohammed, et al., 2015). Αυτά τα συστήματα διασφαλίζουν ότι όταν η παραγωγή φωτοβολταϊκών είναι ανεπαρκής, το κύριο δίκτυο μπορεί

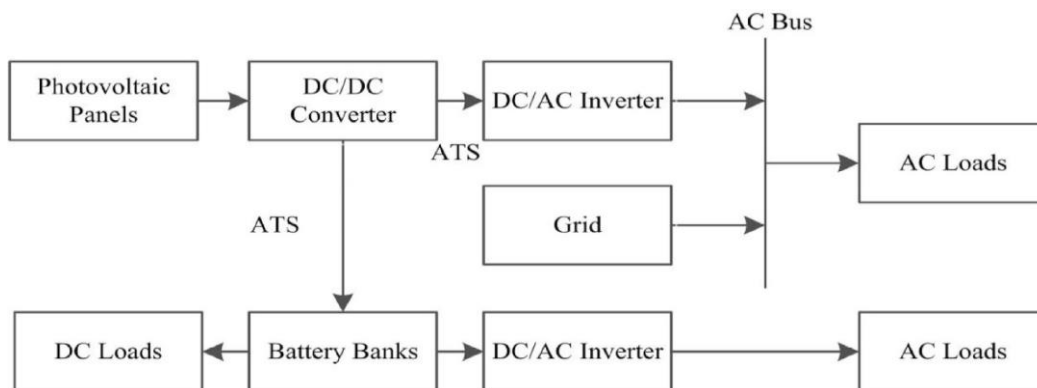


να συμπληρώσει τη ζήτηση ισχύος. Η ισχύς εξόδου του μετατροπέα DC/AC του συστήματος πρέπει να ευθυγραμμίζεται με την τάση, τη συχνότητα και τη σειρά φάσεων του κύριου δικτύου. Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα απαιτούν συνήθως πιο σύνθετες στρατηγικές ελέγχου σε σύγκριση με αυτόνομα συστήματα.



Εικόνα 33: Το διάγραμμα λειτουργίας ενός τυπικού συστήματος παραγωγής φωτοβολταϊκών συνδεδεμένων στο δίκτυο

Η υβριδική λειτουργία, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 31, επιτρέπει τη λειτουργία είτε σε αυτόνομη κατάσταση είτε σε συνδεδεμένη στο δίκτυο, ανάλογα με την κατάσταση αποθήκευσης ενέργειας. Αυτή η λειτουργία περιλαμβάνει έναν αυτόματο διακόπτη μεταφοράς για εναλλαγή μεταξύ των τρόπων λειτουργίας. Όταν οι συστοιχίες μπαταριών είναι πλήρως φορτισμένες, η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κατευθυνθεί στο κύριο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα συνδεδεμένου στο δίκτυο. Αυτή η λειτουργία είναι εξαιρετικά αποδοτική λόγω της ευέλικτης χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας (Qiu, et al., 2015).



Εικόνα 34: Το διάγραμμα λειτουργίας ενός τυπικού υβριδικού συστήματος παραγωγής Φ/Β

#### 4.2.1 Κατάσταση πρακτικής ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία

Η σύγχρονη κατάσταση εφαρμογής της ηλιακής ενέργειας στα πλοία εστιάζει στα φωτοβολταϊκά πάνελ και στην αύξηση της απόδοσης τους. Τα πάνελ έχουν ενισχυθεί με αντανακλαστικές επιστρώσεις και συχνά κατασκευάζονται από κρυσταλλικό πυρίτιο, ένα ημιαγώγιμο και εξαιρετικά αποδοτικό υλικό. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί συστήματα ηλιακής παρακολούθησης για τη βελτιστοποίηση της σύλληψης του ηλιακού φωτός. Αυτά τα συστήματα προσαρμόζουν τον προσανατολισμό των ηλιακών συλλεκτών καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας για να μεγιστοποιήσουν την έκθεση στο ηλιακό φως, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως η παρακολούθηση ενός άξονα, διπλού άξονα και παρακολούθησης βάσει GPS.

Αυτή η δυναμική προσαρμογή είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της απόδοσης παραγωγής ενέργειας στις διάφορες συνθήκες που αντιμετωπίζονται στη θάλασσα. Η συμπερίληψη αποδοτικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, συνήθως μπαταριών ιόντων λιθίου, είναι επίσης κρίσιμη για τη διασφάλιση συνεχούς τροφοδοσίας και αποθήκευσης περίσσειας ηλιακής ενέργειας για χρήση σε συνθήκες χαμηλού ηλιακού φωτός ή νυχτερινές λειτουργίες (Verma, et al., 2021).

Ορισμένα πλοία πειραματίζονται με ηλιακά πανιά που συνδυάζουν παραδοσιακά υφασμάτινα πανιά με ενσωματωμένα ηλιακά κύτταρα. Αυτά τα πανιά εξυπηρετούν έναν διπλό σκοπό της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας και της μετατροπής του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια (Damian, et al., 2022).

Η υιοθέτηση της ηλιακής ενέργειας στα πλοία ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο του σκάφους. Για μικρότερα σκάφη, όπως σκάφη αναψυχής, ferry boats και παράκτια πλοία μικρής εμβέλειας, η ηλιακή ενέργεια μπορεί συχνά να χρησιμοποιηθεί ως κύρια πηγή πρόωσης. Αυτά τα μικρότερα σκάφη μπορούν να κινηθούν αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας την ενέργεια που παράγεται από τα ηλιακά πάνελ. Από την άλλη πλευρά, τα μεγαλύτερα εμπορικά πλοία χρησιμοποιούν κυρίως την ηλιακή ενέργεια ως συμπληρωματική πηγή λόγω των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων και του περιορισμένου χώρου για την εγκατάσταση επαρκών ηλιακών συλλεκτών. Σε αυτές τις εφαρμογές, η ηλιακή ενέργεια συμπληρώνει τις παραδοσιακές μεθόδους πρόωσης, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων. Αυτή η προσέγγιση βελτιώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεγάλων πλοίων και συμβάλλει στην εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους με την πάροδο του χρόνου. Συνοπτικά οι τρέχουσες εφαρμογές σε διαφορετικούς τύπους πλοίων είναι:

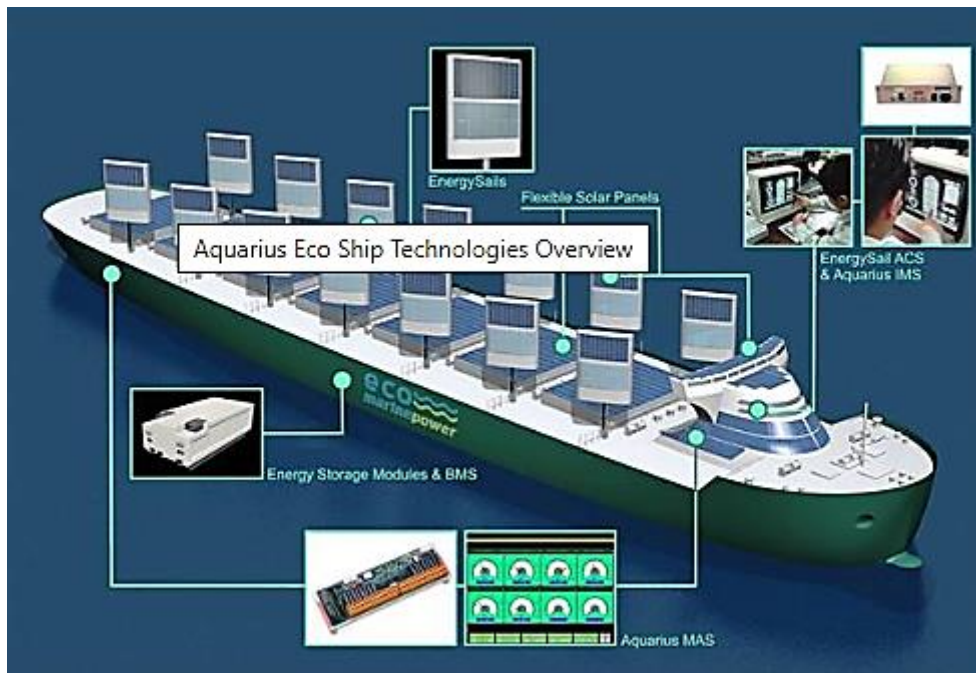
- Φορτηγά πλοία: Η εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας σε φορτηγά πλοία είναι κυρίως για ανάγκες βοηθητικής ενέργειας όπως φωτισμός, ψύξη και ηλεκτρονικά

συστήματα τροφοδοσίας. Ορισμένα καινοτόμα φορτηγά πλοία έχουν ενσωματώσει εκτεταμένες συστοιχίες ηλιακών συλλεκτών στα καταστρώματα τους, συμβάλλοντας σημαντικά στη συνολική τροφοδοσία τους.

- **Επιβατηγά και κρουαζιερόπλοια:** Στα επιβατηγά και κρουαζιερόπλοια, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για απαιτήσεις τόσο βοηθητικής όσο και κύριας ενέργειας.
- **Αλιευτικά σκάφη:** Τα μικρότερα αλιευτικά σκάφη υιοθετούν ηλιακούς συλλέκτες για την τροφοδοσία του εξοπλισμού και των συστημάτων πρόωσης επί του σκάφους. Αυτό είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο σε παράκτιες κοινότητες όπου η βιωσιμότητα είναι το κλειδί για τη διατήρηση των ιχθυαποθεμάτων και τη μείωση του λειτουργικού κόστους.

Ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα πλοίων που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια είναι:

- **MS Tûranor PlanetSolar:** Το πρώτο σκάφος που έκανε τον γύρο του πλανήτη τροφοδοτούμενο αποκλειστικά από ηλιακή ενέργεια. Πρόκειται για καταμαράν που ανέδειξε τις δυνατότητες της ηλιακής ενέργειας για μεγάλα θαλάσσια ταξίδια (Collins, 2013).
- **Aquarius Eco Ship:** Ένα παράδειγμα φορτηγού πλοίου με σύστημα ηλιακών πάνελ μεγάλης κλίμακας. Αυτό το έργο καταδεικνύει πώς τα σύγχρονα φορτηγά πλοία μπορούν να μειώσουν την εξάρτηση από τα παραδοσιακά καύσιμα ενσωματώνοντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (EcomarinePower, 2013).



Εικόνα 35: Aquarius Eco Ship (EcomarinePower, 2013)

Ενώ η υιοθέτηση της ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία είναι πολλά υποσχόμενη, προκλήσεις όπως η ανάγκη για μεγάλες περιοχές εγκατάστασης, η διαλείπουσα ηλιακή ενέργεια και το υψηλό αρχικό κόστος παραμένουν. Οι μελλοντικές κατευθύνσεις περιλαμβάνουν την ενοποίηση της ηλιακής ενέργειας με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τη βελτίωση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και την ανάπτυξη κανονισμών για την υποστήριξη της χρήσης της ηλιακής ενέργειας στις θαλάσσιες δραστηριότητες.

#### 4.2.2 Προκλήσεις Εφαρμογών Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στην Ναυτιλία

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλιακών φωτοβολταϊκών (PV) έχουν επεκτείνει τη δυνατότητα εφαρμογής της σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλιακής βιομηχανίας, η οποία ιστορικά θεωρούσε την ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας ως αντιοικονομική. Αυτή η στροφή αποδεικνύεται από την αυξανόμενη αποδοχή της φωτοβολταϊκής ηλιακής τεχνολογίας σε μεγάλα πλοία, σηματοδοτώντας μια σημαντική μετατόπιση από την αρχική της εφαρμογή σε μικρότερα πλοία και πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων. Αυτή η ενσωμάτωση θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τον μετριασμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) στη ναυτιλία (ABS, 2021).

Η εγκατάσταση και η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστοιχιών σε θαλάσσια συστήματα ενέργειας είναι καθοριστικής σημασίας για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και την ενίσχυση της σταθερότητας

των συστημάτων ισχύος των πλοίων. Ωστόσο, η εφαρμογή ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε θαλάσσια σκάφη απαιτεί σχολαστική εξέταση πολλών παραγόντων ορισμένοι από τους οποίους είναι:

- **Μεταβλητότητα ηλιακής ακτινοβολίας:** Η απόδοση των φωτοβολταϊκών μονάδων εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τις κλιματικές συνθήκες. Αυτή η μεταβλητότητα είναι ιδιαίτερα έντονη στις θαλάσσιες συνθήκες, όπου τα πλοία αντιμετωπίζουν ποικίλες διαδρομές και δυναμικές καιρικές συνθήκες. Κατά συνέπεια, η ενσωμάτωση των δεδομένων δρομολόγησης, καιρού και ακτινοβολίας είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στα πλοία (Wind propulsion optimization and its integration with solar power, 2019).
- **Παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας:** Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από το άμεσο ηλιακό φως. Ωστόσο, παράγοντες όπως η σκόνη, τα σύννεφα και τα σωματίδια μπορούν να εμποδίσουν την παραγωγή. Επιπλέον, η αναντιστοιχία μεταξύ των ωρών αιχμής ηλιακής ακτινοβολίας και της ενεργειακής ζήτησης του πλοίου καθιστά αναγκαία την ένταξη ενός συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο πλαίσιο εγκατάστασης φωτοβολταϊκών.
- **Αξιοποίηση δυναμικότητας και αποθήκευση ενέργειας:** Δεδομένων των υψηλών απαιτήσεων χώρου εγκατάστασης για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, η εφαρμογή τους στα πλοία συχνά περιλαμβάνει παθητική φόρτιση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επί του πλοίου. Αυτά τα συστήματα βοηθούν στη διαχείριση των απαιτήσεων φορτίου αιχμής και της προσωρινής αποθήκευσης φορτίου. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός του εξοπλισμού μετατροπής ισχύος και των διατάξεων φόρτισης της μπαταρίας καθίσταται κρίσιμος στις θαλάσσιες εφαρμογές φωτοβολταϊκών.
- **Ανθεκτικότητα σε θαλάσσιες συνθήκες:** Τα φωτοβολταϊκά πάνελ θαλάσσης πρέπει να αντέχουν σε σκληρές συνθήκες όπως υψηλή υγρασία και διάβρωση. Αυτοί οι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν βραχυκυκλώματα και να υποβαθμίσουν τα μηχανικά εξαρτήματα των μετατροπέων (Paulson, et al., 2019).
- **Χωρικοί περιορισμοί στα πλοία:** Σε σύγκριση με τα επίγεια φωτοβολταϊκά συστήματα, οι θαλάσσιες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις αντιμετωπίζουν αυστηρούς περιορισμούς χώρου. Είναι απαραίτητο να τοποθετούνται αυτά τα συστήματα σε

προσβάσιμες τοποθεσίες για να διευκολύνεται η συντήρηση και η λειτουργία (Paulson, et al., 2019).

- Μεθοδολογίες ελέγχου MPPT: Η μεταβλητότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος θέτει προκλήσεις για την εφαρμογή των μεθοδολογιών ελέγχου Maximum Power Point Tracking (MPPT) στα φωτοβολταϊκά συστήματα πλοίων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι MPPT ενδέχεται να έχουν χαμηλή απόδοση, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών. Συνεπώς, υπάρχει πιεστική ανάγκη για πιο εύρωστες και αξιόπιστες μεθοδολογίες ελέγχου MPPT προσαρμοσμένες σε μεγάλα ωκεάνια πλοία (Paulson, et al., 2019).

Συμπερασματικά, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα προσφέρουν μια βιώσιμη λύση για τη μείωση των εκπομπών GHG στη ναυτιλιακή βιομηχανία, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την αντιμετώπιση αυτών των βασικών παραμέτρων. Η πρόσφατη τάση εγκατάστασης ηλιακών συλλεκτών σε διάφορους τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, των δεξαμενόπλοιων και των κρουαζιερόπλοιων, υποδηλώνει τις δυνατότητες της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών ως συμπληρωματική πηγή ενέργειας. Ωστόσο, λόγω της διαλείπουσας φύσης της ηλιακής ακτινοβολίας, αυτά τα συστήματα είναι πιο κατάλληλα ως βοηθητικές πηγές ενέργειας παρά ως πρωτογενείς γεννήτριες ενέργειας.

#### 4.2.3 Ηλιακή υποβοηθούμενη ενέργεια σε πλοία μεγάλης κλίμακας

Τα τελευταία χρόνια, η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει δει μια αυξανόμενη τάση στην ενσωμάτωση της τεχνολογίας ηλιακής ενέργειας σε μεγάλης κλίμακας πλοία. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (PV) συστημάτων επί του σκάφους, τα οποία ενσωματώνονται απρόσκοπτα στο δίκτυο ηλεκτρικής πρόωσης του πλοίου. Η στρατηγική τοποθέτηση φωτοβολταϊκών γεννητριών μεγάλης κλίμακας σε πλοία, ιδιαίτερα εκείνων με εκτεταμένες επιφάνειες άνω καταστρώματος, υπήρξε βασικός παράγοντας για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας αυτής της τεχνολογίας.

Η υιοθέτηση της ηλιακής υποβοηθούμενης παραγωγής ενέργειας εξυπηρετεί έναν διπλό σκοπό: μειώνει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου και μετριάζει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG). Εμπειρικά δεδομένα υποδηλώνουν ότι η εφαρμογή ηλιακής τεχνολογίας σε μεγάλα πλοία μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή μείωση του CO<sub>2</sub> κατά περίπου 0,2% έως 12% (Bouman, et al., 2017). Επιπλέον, ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα αυτής της εφαρμογής έχει δείξει ότι η εγκατάσταση συστημάτων ηλιακής ενέργειας σε πλοία μεγάλης

κλίμακας μπορεί να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου έως και 8 τόνους την ημέρα ή περίπου 2.400 τόνους ετησίως, με την προϋπόθεση ότι το πλοίο λειτουργεί για 300 ημέρες το χρόνο ( 50 από 52 εβδομάδες). Αυτή η ουσιαστική μείωση στη χρήση καυσίμου όχι μόνο ωφελεί το περιβάλλον αλλά επίσης μεταφράζεται σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους. Σε διάστημα 20 ετών, εκτιμάται ότι μια τέτοια εγκατάσταση θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους καυσίμου περίπου 100 εκατομμυρίων USD ή περίπου 5 εκατομμυρίων USD ετησίως (Hammarlund, et al., 2017).

Η συλλογή δεδομένων για διάφορα πλοία με ηλιακή υποβοήθηση, είτε βρίσκονται ήδη σε λειτουργία είτε στο στάδιο ανάπτυξης, αναδεικνύει τις ποικίλες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας. Κυρίως, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για φωτισμό και άλλες ηλεκτρικές ανάγκες επί του σκάφους. Ο Πίνακας 7 περιγράφει συγκεκριμένα σκάφη που χρησιμοποιούν ηλιακή υποβοηθούμενη ενέργεια και σκιαγραφεί τα αντίστοιχα πλεονεκτήματά τους, υπογραμμίζοντας την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας.

Με βάση αυτά τα δεδομένα είναι πιθανό ότι στο μέλλον θα υπάρξει σημαντική εξέλιξη στον σχεδιασμό των πλοίων, ενσωματώνοντας την ηλιακή ενέργεια ως τυπικό χαρακτηριστικό.

Πίνακας 7: Εφαρμογή σε πλοία μεγάλης κλίμακας που τροφοδοτούνται με ηλιακή ενέργεια

Όνομα (Τύπος)	Διαστάσεις (L x B) (m)	Φωτοβολταϊκό Σύστημα Παραγωγής	Μπαταρία	Χρήση	Οφέλη χρήσης	Αναφορές
Emerald Ace (Car Carrier)	200 x 32	768 PV panel, 160 kW ονομαστική ισχύς	Li-ion battery, 2.2 MWh	Πλοήγηση, σύστημα ισχύος	Μείωση καυσίμου, μείωση εκπομπών CO <sub>2</sub> , Ενεργειακή απόδοση	(Japan Ship Exporters ' Association , 2012)
COSCO "Tengfei" (Car Carrier)	182.8 x 32.2	1050 m <sup>2</sup> PV panel, 143.1 kW ονομαστική ισχύς	Li-ion battery, 750 kWh	Φωτισμός καμπίνας	1,8% μείωση κατανάλωσης καυσίμου, μείωση εκπομπών CO <sub>2</sub> κατά 1,5%, εξοικονόμηση 133626 \$ US\$ κόστους καυσίμου/έτος	(Ship.sh, 2022), ( Yuan, et al., 2018)
Blue Star Delos (Passenger Ferry)	145 x 22	144 m <sup>2</sup> PV panel, 1.32 kWp	VLRA battery, 5.4 kWh	Ηλεκτρικά πλοίου	Μείωση στην κατανάλωση καυσίμου, Μείωση στις εκπομπές NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> και CO <sub>2</sub> .	(Atkinson, 2016)
AN JI 204 (Ro-Ro Ship)	110 x 18.8	135 PV panels, 37.12 kWp ονομαστική ισχύς	Li-ion battery, 128 kW	Σύστημα φωτισμού	Μείωση στην κατανάλωση καυσίμου 10 t/έτος, Μείωση 630 kg/έτος SO <sub>x</sub> , Μείωση 50 kg/έτος NO <sub>x</sub> , Μείωση 28,5 τόνους/έτος CO <sub>2</sub> .	( Pan, et al., 2021)
Drive Green Highway (Car Carrier)	200 x 38	900 solar frontier CIS panel, 150 kW ονομαστική ισχύς	-	Σύστημα φωτισμού πλήρως LED του καταστρώματος	Μείωση SO <sub>x</sub> 90% /μεταφερόμενο όχημα, Μείωση NO <sub>x</sub> 50% /μεταφερόμενο όχημα, Μείωση CO <sub>2</sub> 25% /μεταφερόμενο όχημα	(News Hound, 2016)



#### 4.2.4 Εξελιγμένα Υβριδικά Ενεργειακά Συστήματα: Ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας με παραδοσιακές και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας σε μεγάλης κλίμακας πλοία και σκάφη βρίσκει ευρεία εφαρμογή. Σ' αυτή τη παράγραφο παρουσιάζεται μια συνοπτική επισκόπηση αξιοσημείωτων έργων σε πλοία που εφαρμόζουν την ηλιακή ενέργεια με άλλες παραδοσιακές ή ανανεώσιμες πηγές, επισημαίνοντας τα βασικά χαρακτηριστικά, τα οφέλη και την τεχνολογική τους ετοιμότητα.

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει ορισμένα έργα, το καθένα με ξεχωριστά χαρακτηριστικά και συνεισφορά στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών με ηλιακή ενέργεια. Τα έργα αυτά είναι χαρακτηριστικά της ποικιλόμορφης εφαρμογής της ηλιακής τεχνολογίας στις θαλάσσιες δραστηριότητες. Το σύστημα Aquarius MRE της Eco Marine Power, για παράδειγμα, είναι ένας συνδυασμός ηλιακής ενέργειας και πρόωσης υποβοηθούμενης από πανιά, με στόχο να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές άνθρακα και την κατανάλωση καυσίμου. Αντίθετα, έργα όπως τα Silent Yachts - Silent 55 και Sunreef Yachts - Eco 80 Sail Catamaran αντιπροσωπεύουν την κίνηση του κλάδου των πολυτελών γιοτ προς βιώσιμες πρακτικές, δίνοντας έμφαση στην φιλικότητα προς το περιβάλλον χωρίς συμβιβασμούς στις ανέσεις.

Τα οφέλη που επισημαίνονται στον Πίνακα 8 είναι ποικίλα κυρίως όμως εστιάζουν στη μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και στην ενεργειακή απόδοση, όπως το ποσοστό των ενεργειακών απαιτήσεων που καλύπτονται από τα ηλιακά πάνελ στην περίπτωση της Solar-Powered Inland Shipping, που αναπτύχθηκε από ερευνητές στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Ντελφτ. Αυτοί οι αριθμοί είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση του πιθανού αντίκτυπου της ηλιακής ολοκλήρωσης στη μείωση της εξάρτησης από παραδοσιακές πηγές καυσίμων.

Επιπλέον, τα εκτιμώμενα επίπεδα ετοιμότητας τεχνολογίας (TRL) προσφέρουν πληροφορίες για την ωριμότητα κάθε έργου. Τα περισσότερα έργα που αναφέρονται εδώ παρουσιάζουν υψηλά TRL, υποδεικνύοντας ότι είτε βρίσκονται σε προχωρημένα στάδια δοκιμών, είτε είναι ήδη λειτουργικά ή διαθέσιμα στο εμπόριο. Αυτή η πτυχή υπογραμμίζει την πρόοδο που σημειώθηκε στον τομέα και την αυξανόμενη σκοπιμότητα των θαλάσσιων μεταφορών με ηλιακή ενέργεια.

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι αυτά τα έργα, αν και ποικίλα, μοιράζονται κοινούς στόχους βιωσιμότητας, αποτελεσματικότητας και μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Δεν αντιπροσωπεύουν μόνο τεχνολογικές εξελίξεις αλλά και δέσμευση για ένα πιο πράσινο μέλλον στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει αυτά τα πρωτοποριακά έργα, παρέχοντας ένα στιγμιότυπο του τρέχοντος τοπίου των πλοίων και σκαφών που λειτουργούν με ηλιακή ενέργεια.

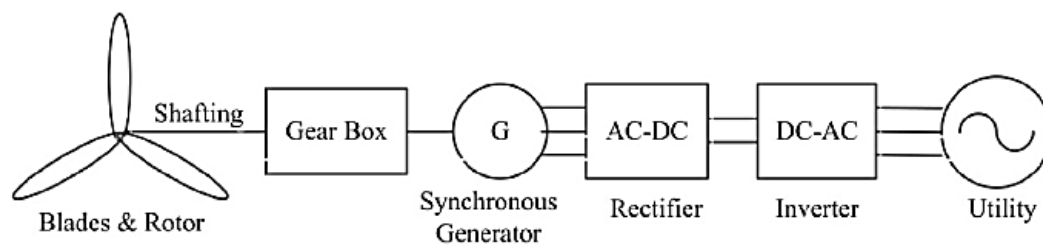
Πίνακας 8: Περιπτώσεις πλοίων που ενσωματώνουν ηλιακή ενέργεια σε υβριδικά συστήματα

Όνομα Πλοίου (Τύπος)	Πηγή Ενέργειας	Υβριδικό Σύστημα	Εκτίμηση TRL	Αιτιολόγηση Εκτίμησης TRL	Οφέλη
<b>Solar Sailor (Tourism Ferry)</b>	Solar / Wind / Battery / LPG	Lead-acid gel battery (80 x 70 Ah), 2 x 40 kW electrical motor	6	Τεχνολογία που εφαρμόζεται σε σχετικό περιβάλλον	Εξοικονόμηση 250.000 λίτρων κατανάλωσης καυσίμου ντίζελ/έτος, Μείωση εκπομπών GHG 670 τόνων/πλοίο
<b>Soliloquy-Super Green Yacht (Yacht)</b>	Solar / Wind / Fuel Cells	600m <sup>2</sup> solar sail	4-5	Ιδέα και σχεδιασμός επικυρώθηκαν μέσω βραβείων και αναγνώρισης του κλάδου	Τρεις φορές χαμηλότερες εκπομπές ρύπων σε σύγκριση με το ντίζελ
<b>NYK Super Eco Ship 2030 (Cruise - Design Concept)</b>	Solar / Wind / Fuel Cell	8 lightweight sails (capacity 2.5 MW power/sail), PV panel (capacity 1.6 MW)	4	Ιδέα με λεπτομερή σχεδιασμό, που δεν έχει ακόμη εφαρμοσθεί σε λειτουργικό περιβάλλον	Πιθανή μείωση των εκπομπών CO <sub>2</sub> κοντά στο 70%
<b>Eoseas Cruise (Cruise – Design Concept)</b>	Solar / Wind / Fuel Cell	4 dual-fuel LNG diesel/electric generator sets (each providing 8 MW power), 300m <sup>2</sup> PV panels	4-5	Προηγμένος σχεδιασμός και δοκιμές που ολοκληρώθηκαν, αλλά δεν έχουν αναπτυχθεί σε λειτουργικό περιβάλλον	Μείωση στην κατανάλωση καυσίμου 50%, Μείωση 100% SO <sub>x</sub> , Μείωση 90% NO <sub>x</sub>
<b>Hornblower Hybrid (Passenger Ferry)</b>	Solar / Wind / Diesel / Battery	Tier II Diesel Engine, 380 VDC AGM Battery Banks, Wind turbines (capacity 5 kW), PV array panels (capacity 20 kW)	7-8	Σε λειτουργία με την υπάρχουσα τεχνολογία, η πρόωση υδρογόνου εκκρεμεί	Μείωση 70% στην κατανάλωση καυσίμου, 75 – 100% πιθανή μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου
<b>E/S Orcelle (Yacht - Design Concept)</b>	Solar / wind, wave energy / fuel cells / and LNG	3 rigid sail (1400 m <sup>2</sup> ), 800 m <sup>2</sup> PV array (produces 2500 kW power), 12 horizontal fins	2-3	Μοντέλο σε ανάπτυξη	Μηδενικές εκπομπές

Αυτός ο πίνακας χρησιμεύει ως συνοπτική αναφορά για την κατανόηση του εύρους και της κλίμακας των εφαρμογών ηλιακής ενέργειας στις θαλάσσιες μεταφορές. Είναι προφανές από αυτά τα παραδείγματα ότι η ενσωμάτωση της ηλιακής τεχνολογίας σε πλοία και γιοτ δεν είναι απλώς μια θεωρητική ιδέα, αλλά μια πρακτική λύση που υιοθετείται όλο και περισσότερο σε ολόκληρο τον κόσμο.

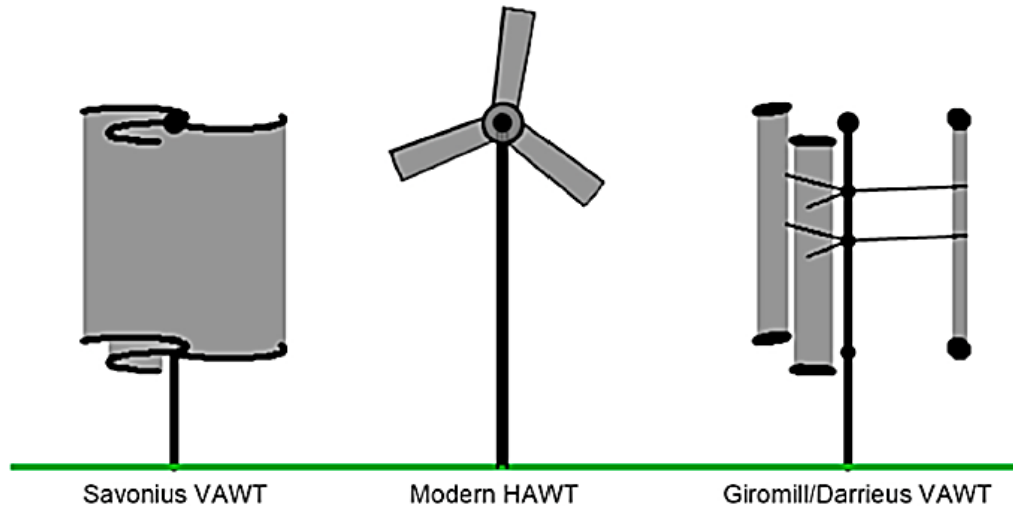
### 4.3 Αιολική Ενέργεια-Τεχνολογίες - Αρχές λειτουργίας

Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας με αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χαρακτηρίζονται από τους σχετικά γρήγορους χρόνους εγκατάστασης και την ικανότητά τους να λειτουργούν συνεχώς, υπό την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα του ανέμου είναι επαρκής (Zheng, et al., 2016). Ένα τυπικό σύστημα παραγωγής μέσω αιολικής ενέργειας που απεικονίζεται στην Εικόνα 35, εξαρτάται κυρίως γύρω από την ανεμογεννήτρια, η οποία είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο της.



Εικόνα 36: Τυπική δομή του συστήματος παραγωγής αιολικής ενέργειας.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες, που απεικονίζονται στην Εικόνα 36 κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους: ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbines, HAWT) και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (Vertical Axis Wind Turbines, VAWT). Τα HAWT έχουν γίνει η κυρίαρχη επιλογή στον τομέα παραγωγής αιολικής ενέργειας λόγω της ανώτερης απόδοσης και των υψηλότερων δυνατοτήτων παραγωγής ενέργειας (Kumar, et al., 2016). Αντίθετα, τα VAWT εγκαθίστανται γενικά σε επιφάνειες χαμηλού υψομέτρου, γεγονός που περιορίζει την έκθεσή τους σε ισχυρούς ανέμους και, κατά συνέπεια, έχουν σχετικά χαμηλότερη απόδοση ισχύος. Η αύξηση της ισχύος των συστημάτων VAWT θα οδηγούσε αναπόφευκτα σε αυξημένο κόστος. Αυτό συμβαίνει επειδή η βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους θα απαιτούσε όχι μόνο πρόσθετα υλικά αλλά και λεπίδες μεγαλύτερου μεγέθους (Riegler, 2003).



Εικόνα 37: Τρεις κύριοι τύποι ανεμογεννητριών

Παρά αυτές τις προκλήσεις, τα συστήματα VAWT προσφέρουν αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα. Είναι γνωστά για τις χαμηλότερες εκπομπές θορύβου και την ικανότητά τους να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και σε συνθήκες ανέμου χαμηλής ταχύτητας. Επιπλέον, δεν έχουν αυστηρές απαιτήσεις ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν τα VAWT ιδιαίτερα κατάλληλα για εγκατάσταση σε ορισμένα περιβάλλοντα, όπως σε διάφορες πλατφόρμες (Syed, et al., 2017). Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις των VAWT σε παράγοντες όπως η ποιότητα ισχύος, η αξιοπιστία του δικτύου και η σταθερότητα του πλοίου, που απαιτούν προσοχή και στρατηγικές μετριασμού (Chowdhury, et al., 2012).

#### 4.3.1 Η Αιολική Ενέργεια στη Ναυτιλιακή Βιομηχανία

Στις σύγχρονες ναυτιλιακές επιχειρήσεις, υπάρχουν δύο κύριες εφαρμογές της αιολικής ενέργειας: η αιολική πρόωση πλοίων (Wind-assisted ship propulsion, WASP) και η παραγωγή αιολικής ενέργειας (Wind Power Generation, WPG). Αυτές οι μέθοδοι αντιπροσωπεύουν την πρώτη γραμμή της ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Η θαλάσσια αιολική ενέργεια είναι ιδιαίτερα συμφέρουσα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με την αντίστοιχη επίγεια. Αυτό το πλεονέκτημα προκύπτει επειδή, στη θάλασσα, η αιολική ενέργεια παρουσιάζει μειωμένες απώλειες και μικρότερη μείωση της ταχύτητας του ανέμου λόγω χαμηλότερων επιπέδων τριβής. Επιπλέον, ο ανοιχτός ωκεανός προσφέρει μεγαλύτερη και πιο σταθερή έκθεση στον άνεμο σε σύγκριση με την ξηρά, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων αιολικής ενέργειας στα πλοία. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας όχι μόνο

συμβάλλει σε πιο βιώσιμες ναυτιλιακές πρακτικές, αλλά προσφέρει επίσης μια δυνητικά πιο αποτελεσματική ενεργειακή λύση σε σύγκριση με τα επίγεια συστήματα αιολικής ενέργειας.

#### 4.3.2 Παραγωγή αιολικής ενέργειας σε πλοία (WPG)

Η παραγωγή αιολικής ενέργειας, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του ανέμου, είναι χαρακτηριστική μέθοδος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία. Κατά την ενσωμάτωση ενός συστήματος παραγωγής αιολικής ενέργειας στο σύστημα ισχύος ενός πλοίου, η επιλογή του κατάλληλου τύπου ανεμογεννήτριας είναι κρίσιμη. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT) είναι γνωστές για την υψηλή τους απόδοση και ισχύ εξόδου σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT). Ωστόσο, τα συστήματα VAWT συχνά ευνοούνται στις εφαρμογές σε πλοία λόγω του απλούστερου σχεδιασμού, της ευκολίας λειτουργίας, του χαμηλότερου κόστους και της σταθερότητας που παρέχουν στο πλοίο (Pope, et al., 2010).

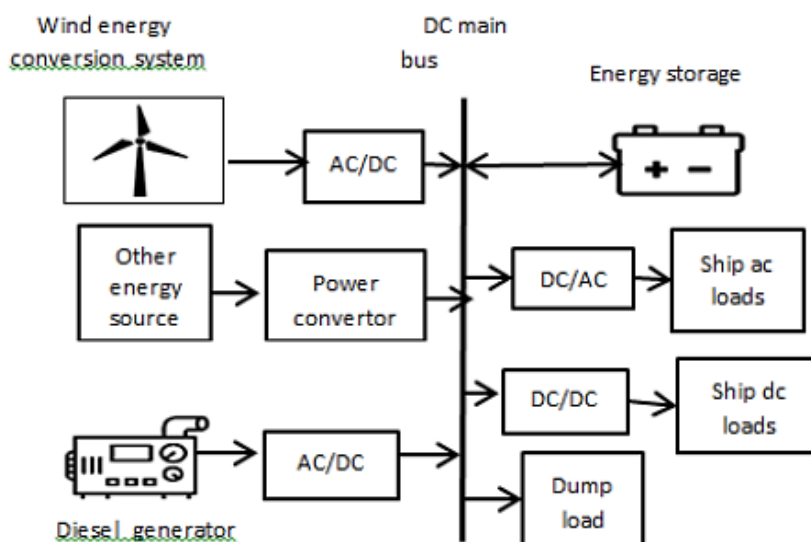


Εικόνα 38: Το πλοίο «Hornblower Hybrid».

#### 4.3.3 Μεθοδολογία ενσωμάτωσης συστημάτων μετατροπής ενέργειας στην ισχύ του πλοίου (wind energy conversion system, WECS)

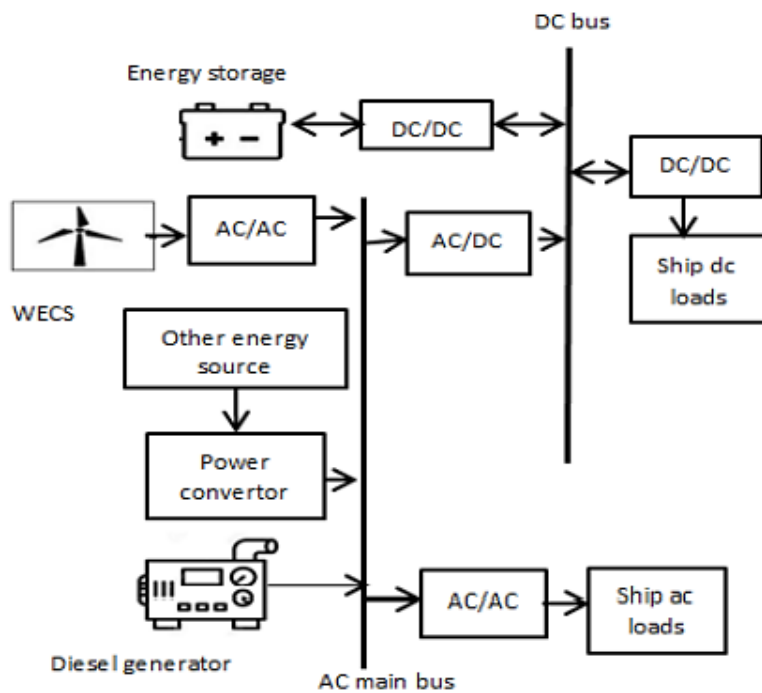
Το κύριο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου μπορεί να λειτουργήσει είτε ως σύστημα διαύλου εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) είτε ως σύστημα διαύλου συνεχούς ρεύματος (DC). Το Σύστημα Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας (WECS) μπορεί να συνδεθεί με δύο διαφορετικές διαμορφώσεις.

Στην πρώτη διαμόρφωση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 38, το WECS είναι συνδεδεμένο με τον κύριο δίαυλο DC του πλοίου. Το WECS αρχικά παράγει AC, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε DC χρησιμοποιώντας έναν ανορθωτή πριν τροφοδοτηθεί στο κύριο σύστημα διαύλου DC του πλοίου. Άλλες πηγές ενέργειας, όπως κυψέλες καυσίμου, φωτοβολταϊκά πάνελ και βιοντίζελ, μπορούν επίσης να ενσωματωθούν μέσω κατάλληλων συσκευών μετατροπής ισχύος. Η κύρια γεννήτρια ισχύος, συνήθως μια γεννήτρια ντίζελ, παράγει AC που μπορεί να μετατραπεί σε DC για να τροφοδοτηθεί στον κοινό δίαυλο DC. Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας όπως οι μπαταρίες αποθηκεύουν περίσσεια ενέργειας και παρέχουν αμφίδρομη ροή ανάλογα με τη ζήτηση. Στη συνέχεια, ένας μετατροπέας μετατρέπει το DC ξανά σε εναλλασσόμενο ρεύμα για να καλύψει τις απαιτήσεις φορτίου AC του πλοίου. Το σύστημα διαύλου συνεχούς ρεύματος μπορεί επίσης να παρέχει απευθείας ισχύ σε φορτία DC χρησιμοποιώντας μετατροπέα DC σε DC. Αυτή η ρύθμιση εξαλείφει την ανάγκη για άεργο ισχύ και συγχρονισμό της συχνότητας του διαύλου, εξοικονομώντας χώρο και βάρος στο πλοίο. Η περίσσεια ενέργεια από το WECS μπορεί να καταναλωθεί από ένα φορτίο «χωματερής» (dump load) για να διατηρείται το σωστό επίπεδο τάσης.



Εικόνα 39: Συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας συνδεδεμένα με το κύριο δίαυλο συνεχούς ρεύματος του πλοίου (Paulson, et al., 2019)

Η δεύτερη διαμόρφωση, που φαίνεται στην Εικόνα 39, περιλαμβάνει το κύριο σύστημα διαύλου AC του πλοίου, το οποίο υποστηρίζεται από ένα πρόσθετο σύστημα διαύλου DC. Εδώ, η έξοδος από το WECS ρυθμίζεται με ένα φίλτρο AC/AC πριν τροφοδοτηθεί στον κύριο δίαυλο AC του πλοίου. Ο πρόσθετος δίαυλος DC ικανοποιεί τις απαιτήσεις φορτίου συνεχούς ρεύματος του πλοίου. Ορισμένα έργα έχουν ενσωματώσει επιτυχώς συστήματα αιολικής ενέργειας σε πλοία για ανάγκες βοηθητικής ενέργειας, ενώ άλλα έχουν χρησιμοποιήσει την αιολική ενέργεια για να βοηθήσουν στην πρόωση των πλοίων. Τα συστήματα αιολικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδέοντάς τα με το δίκτυο του πλοίου ή λειτουργώντας ανεξάρτητα. Ο βέλτιστος συνδυασμός αιολικής ενέργειας και άλλων πηγών ενέργειας καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το μέγεθος και ο τύπος του πλοίου, η οικονομία και η διαδρομή του.



Εικόνα 40: Συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας που συνδέονται με τον κύριο δίαυλο AC του πλοίου (Paulson, et al., 2019).

#### 4.3.4 Προκλήσεις εφαρμογής συστημάτων μετατροπής αιολικής ενέργειας σε πλοία

Η ενσωμάτωση Συστημάτων Μετατροπής Αιολικής Ενέργειας (WECS) σε πλοία περιλαμβάνει την αντιμετώπιση πολλών τεχνικών προκλήσεων, ιδίως όσον αφορά τα πτερύγια των στροβίλων, τους περιορισμούς ροής αέρα, τις αποστάσεις ασφαλείας, τη σταθερότητα του σκάφους και την τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας. Ακολουθεί μια επισκόπηση αυτών των προκλήσεων:

- Βελτιστοποίηση πτερυγίων στροβίλου: Ο σχεδιασμός των πτερυγίων του στροβίλου στοχεύει στη μεγιστοποίηση της καθαρής προς τα εμπρός δύναμης για την προώθηση του πλοίου. Η εξοικονόμηση καυσίμου μπορεί να βελτιωθεί με τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των λεπίδων, που μπορεί να περιλαμβάνει την προσθήκη πτερυγίων, γεννητριών στροβιλισμού, εύκαμπτων λεπίδων και υποδοχών, αλλάζοντας το σχήμα, τον αριθμό, την αναλογία πλευρών του ρότορα και το αεροδυναμικό προφίλ. Η εφαρμογή λύσεων αυτόματης εκκίνησης μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την απόδοση και να μειώσει το θόρυβο. Για ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα μικρότερης ισχύος (VAWTs), υλικά όπως ανθρακονήματα (CFRP) προτιμώνται για τη χαμηλή τους αδράνεια, ενώ το fiberglass (GFRP) προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία παρά το γεγονός ότι είναι βαρύτερο.
- Περιορισμός ροής αέρα: Η εισαγωγή ανεμογεννητριών σε πλοία μπορεί να αυξήσει την αντίσταση του αέρα, επηρεάζοντας δυνητικά την ικανότητα του σκάφους να διέρχεται από κανάλια ή κάτω από γέφυρες με περιορισμούς ύψους. Ενώ οι στροβίλοι γενικά δεν συμβάλλουν σημαντικά στην οπισθέλκουσα, ειδικά όταν είναι ανενεργοί ή περιστρέφονται κατακόρυφα, μια αύξηση της οπισθέλκουσας μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα του σκάφους, προκαλώντας αυξημένη κύλιση ή κλίση, ιδιαίτερα όταν ο άνεμος έρχεται από την αντίθετη κατεύθυνση.
- Ασφάλεια: Η εγκατάσταση των στροβίλων πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ασφάλεια του πληρώματος και της δομής του πλοίου. Απαιτείται επαρκής απόσταση από τα πτερύγια του στροβίλου μέχρι το ύψος των εξάλων του πλοίου για τη διασφάλιση της ασφάλειας του πληρώματος και απαιτείται μια ζώνη προστασίας γύρω από την περιοχή του στροβίλου κατά τη λειτουργία.
- Σταθερότητα του πλοίου: Η σταθερότητα του σκάφους είναι πρωταρχικής σημασίας μετά την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας και των εξαρτημάτων της. Το ύψος και το βάρος των στροβίλων μπορεί να επηρεάσει την ισορροπία του πλοίου. Επομένως, ένα βέλτιστο ύψος στροβίλου πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να πληροί τα κριτήρια σταθερότητας χωρίς να διακυβεύεται η παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, η τοποθέτηση του στροβίλου μπορεί να μετατοπίσει το κέντρο βάρους και το βύθισμα του πλοίου. Έτσι, πρέπει να αξιολογηθεί υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης για να διασφαλιστεί ότι η έλικα παραμένει βυθισμένη, διατηρώντας την απόδοση του σκάφους και αποφεύγοντας την αδικαιολόγητη πίεση στο μηχανήμα.
- Τοποθέτηση ανεμογεννήτριας: Οι ανεμογεννήτριες δεν πρέπει να παρεμβαίνουν στη λειτουργία του σκάφους ή στην άνεση του πληρώματος. Οι ανεμογεννήτριες σε



κρουαζιερόπλοια είναι συχνά τοποθετημένες σε έναν ειδικό ιστό, ο οποίος μπορεί να απαιτεί υλικά απόσβεσης και μονωτικά για την ελαχιστοποίηση του θορύβου και των κραδασμών που μεταδίδονται στο κύτος. Ενώ η ανύψωση της ανεμογεννήτριας σε ιστούς mizzen μπορεί να αυξήσει την παραγωγή ενέργειας, μπορεί επίσης να ενισχύσει το pitch and roll του σκάφους, επηρεάζοντας τη σταθερότητα και την άνεση.

Συμπερασματικά, η επιτυχής εφαρμογή του WECS στα πλοία απαιτεί ενδελεχή σχεδιασμό και καινοτόμες σχεδιαστικές λύσεις για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις. Κάθε πτυχή, από τη βελτιστοποίηση του στροβίλου έως τη διασφάλιση της λειτουργικής ασφάλειας και σταθερότητας, επιβάλλεται να εξεταστεί προσεκτικά για να εναρμονιστούν τα οφέλη της αιολικής ενέργειας με τη λειτουργική ακεραιότητα του σκάφους.

#### 4.3.5 Αιολική πρόωση πλοίων (WASP)

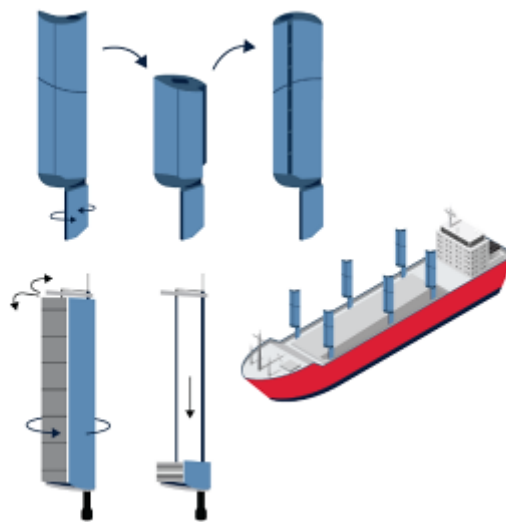
Τα συστήματα αιολικής πρόωσης έχουν σχεδιαστεί για να μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε προωθητική δύναμη για τα πλοία. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν μια ποικιλία φυσικών αρχών για τη μετατροπή ενέργειας, καθεμία από τις οποίες διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας και τη μέθοδο εφαρμογής. Υπάρχουν έξι κύριες κατηγορίες τεχνολογιών αιολικής πρόωσης: Τα πανιά ρότορα (rotors sails) τα οποία χρησιμοποιούν το φαινόμενο Magnus, τα σκληρά πανιά (wing sails) τα οποία είναι άκαμπτα και μοιάζουν με παραδοσιακές ιστιοπλοϊκές κατασκευές, τα πτερύγια αναρρόφησης (suctions wings) που αξιοποιούν την αεροδυναμική ανύψωση, τα ελκόμενα ανεμόπτερα (kites) τα οποία συλλέγουν την αιολική ενέργεια σε μεγαλύτερα υψόμετρα, τα μαλακά πανιά (soft sails) τα οποία είναι εύκαμπτα και μπορούν να προσαρμοστούν στις συνθήκες ανέμου και οι τεχνολογίες κύτους (hull-form technologies) που αξιοποιούν την αιολική ενέργεια μέσω της ίδιας της δομής του πλοίου.

##### **Άκαμπτα πανιά (Wing sails)**

Τα σκληρά πανιά, παρόμοια με τα παραδοσιακά πανιά, αξιοποιούν την αιολική ενέργεια για να παράγουν αεροδυναμικές δυνάμεις ανύψωσης και έλξης που ωθούν ένα πλοίο. Σε αντίθεση με τα μαλακά αντίστοιχά τους, τα σκληρά πανιά έχουν σταθερό σχήμα και είναι κατασκευασμένα από στιβαρά, ελαφριά υλικά όπως ανθρακονήματα. Αυτά τα πανιά έχουν συνήθως σχήμα φτερού, αντλώντας αρχές σχεδίασης από τα φτερά του αεροπλάνου, επιτρέποντάς τους να επιτύχουν υψηλότερη ανύψωση και πιο ευνοϊκή αναλογία ανύψωσης προς έλξη από τα παραδοσιακά πανιά.

Αυτά τα πανιά πτερυγίων έχουν σχεδιαστεί για να περιστρέφονται και να ευθυγραμμίζονται βέλτιστα με τον άνεμο, μια διαδικασία που συχνά αυτοματοποιείται για να μεγιστοποιήσει την απόδοση της πρόωσης. Το μέγεθος των σκληρών πανιών ποικίλλει σημαντικά, και κυμαίνεται από περίπου 12 μέτρα σε ύψος σε μικρότερα πλοία έως πάνω από 50 μέτρα σε μεγαλύτερα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου. Κατά συνέπεια, η επιφάνεια αυτών των πανιών μπορεί να κυμαίνεται από περίπου 30 τετραγωνικά μέτρα έως περίπου 1.000 τετραγωνικά μέτρα, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα για να φιλοξενήσει διάφορα μεγέθη και χρήσεις πλοίων.

Με καινοτόμο τρόπο, ορισμένα σκληρά πανιά είναι εξοπλισμένα με ηλιακούς συλλέκτες, προσθέτοντας λειτουργικότητα και παράγοντας επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η διπλή λειτουργία τα καθιστά ελκυστική επιλογή για πλοία που θέλουν να αυξήσουν την ενεργειακή τους απόδοση και να μειώσουν την εξάρτηση από παραδοσιακές πηγές καυσίμων.



Εικόνα 41: Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας σκληρών πανιών (ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023)

Μελέτες έχουν αξιολογήσει διάφορα μοντέλα άκαμπτων πανιών, όπως τα πανιά τύπου wing sail JAMDA και Walker, τα οποία έδειξαν μείωση κατανάλωσης καυσίμου από 10% έως 30% υπό ευνοϊκές συνθήκες ανέμου (Atkinson, et al., 2018). Επίσης έχουν διερευνηθεί η χρήση υβριδικών πανιών, που συνδυάζουν στοιχεία τόσο μαλακών όσο και άκαμπτων πανιών, όμως αντιμετωπίζουν προκλήσεις εμπορικής βιωσιμότητας λόγω του υψηλού κόστους (Atkinson, και συν., 2018). Στις πρόσφατες καινοτομίες της τεχνολογίας των πανιών έχουν πρωτοστατήσει έργα όπως το Oceanwing, το οποίο στοχεύει να φέρει επανάσταση στην εμπορική ναυτιλία. Αυτό το έργο συνεπάγεται την ανάπτυξη πτερυγίων μεγάλης κλίμακας σε

φορτηγά πλοία, που υπόσχονται μειώσεις κατανάλωσης καυσίμου έως και 15% χωρίς συμβιβασμούς στην ταχύτητα του σκάφους. Το τεχνολογικό άλμα στον σχεδιασμό των wingsail περιλαμβάνει τον αυτοματισμό του ελέγχου των πανιών για την ελαχιστοποίηση της χειροκίνητης επέμβασης και την πιο βατή ενσωμάτωση του συστήματος στα σχέδια των πλοίων.

Το DynaRig, μια μοντέρνα εκδοχή των παραδοσιακών τετράγωνων σκαφών, περιλαμβάνει ανεξάρτητους, περιστρεφόμενους ιστούς με προσαρτημένα πανιά. Αυτό το σύστημα επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με τα κλασικά τετράγωνα πλοία. Η απουσία αρματωσιάς στο κατάστρωμα απλοποιεί τις λειτουργίες και ενισχύει την ασφάλεια. Αξιοσημείωτες υλοποιήσεις του DynaRig περιλαμβάνουν το Maltese Falcon και το Black Pearl, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί υλικά υψηλής ποιότητας, όπως σύνθετα υλικά άνθρακα για την κατασκευή τους. Η περιστροφική ικανότητα των ιστών διευκολύνει τη βέλτιστη ευθυγράμμιση με την κατεύθυνση του ανέμου, μεγιστοποιώντας τις δυνάμεις ανύψωσης.

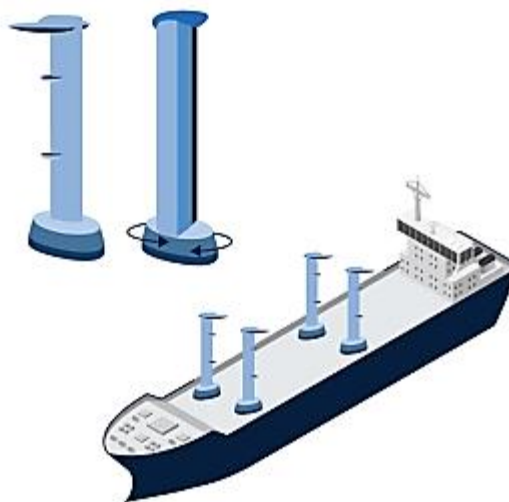
### **Πτερύγια αναρρόφησης**

Τα πτερύγια αναρρόφησης είναι κάθετες κατασκευές με σχήμα αεροτομής, τοποθετημένες στο κατάστρωμα του πλοίου. Αυτές οι συσκευές διαφέρουν από τα πανιά ρότορα καθώς το εξωτερικό τους δεν περιστρέφεται. Τα φτερά αναρρόφησης μπορούν να προσανατολιστούν (με αυτόματη περιστροφή) για να ευθυγραμμιστούν με την κατεύθυνση του ανέμου για βέλτιστη ώθηση. Ενσωματώνουν αεραγωγούς και εσωτερικό ανεμιστήρα για τη χρήση αναρρόφησης οριακής στρώσης, μια μέθοδο που δημιουργεί ώθηση, συμπληρώνοντας τις αεροδυναμικές δυνάμεις που δημιουργούνται από το σχήμα τους, παρόμοια με την αεροδυναμική των σκληρών πανιών.

Τα φτερά αναρρόφησης αποδίδουν καλύτερα με τους ανέμους που προέρχονται από το πλάι και παρέχουν αμελητέα ώθηση όταν η διεύθυνση είναι μετωπικά. Το τυπικό ύψος των πτερυγίων αναρρόφησης είναι μεταξύ 10 και 36 μέτρων. Τα πλοία έχουν συνήθως δύο ή τέσσερα φτερά αναρρόφησης, αν και μερικά μπορεί να έχουν μόνο ένα. Υπάρχουν επίσης συμπαγείς εκδόσεις πτερυγίων αναρρόφησης, ύψους περίπου 10 μέτρων, οι οποίες προσφέρονται ως αρθρωτές μονάδες, ενισχύοντας την ευκολία μεταφοράς και την ευελιξία εγκατάστασης.

Προμηθευτές όπως η Econowind προσφέρουν μοντέλα με εσωτερικούς ανεμιστήρες (Chou, et al., 2021). Χρησιμοποιούνται επίσης μαλακά πανιά, που βρίσκονται σε σχέδια όπως τα

Pinta-Rig, DynaRig, Delta-wing και FastRigs, με το DynaRig να κερδίζει δημοτικότητα για την ευελιξία και την ασφάλειά του (Lu, et al., 2020).



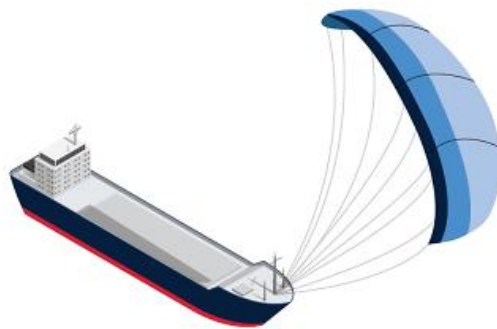
Εικόνα 42: Σχηματική αναπαράσταση πτερυγίων αναρρόφησης (ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023)

### **Ανεμόπτερα έλξης (kites)**

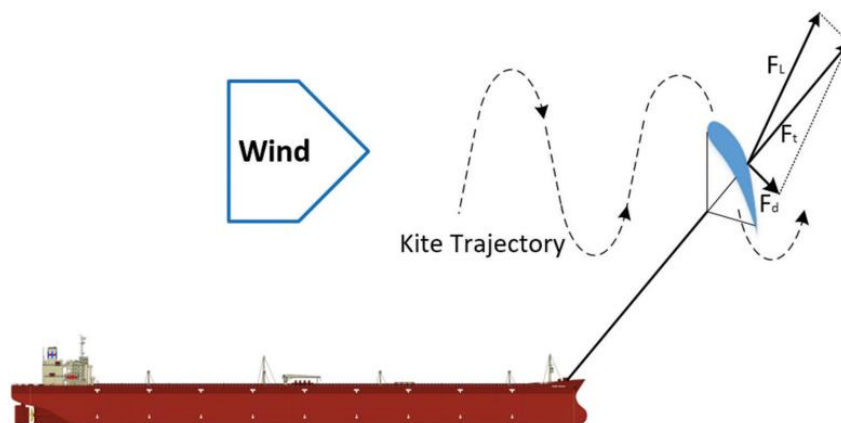
Τα ανεμόπτερα έλξης που χρησιμοποιούνται για θαλάσσια πρόωση είναι δεμένα στην πλώρη του πλοίου και έχουν σχεδιαστεί για να συγκρατούν την αιολική ενέργεια, δημιουργώντας δυνάμεις ανύψωσης και έλξης που τραβούν το σκάφος προς τα εμπρός. Την ανάπτυξη και την απόσυρση αυτών των πανιών τις διαχειρίζονται αυτοματοποιημένα συστήματα για την προσαρμογή των ποικίλων συνθηκών ανέμου. Ένα από τα πλεονεκτήματα των ανεμόπτερων έλξης είναι η ικανότητά τους να εκμεταλλεύονται υψηλότερες ταχύτητες ανέμου σε μεγάλα υψόμετρα. Ωστόσο, πρέπει να διατηρηθεί μια ισορροπία μεταξύ του υψομέτρου που επιτυγχάνεται και της προωστικής δύναμης που δημιουργείται, καθώς αυξάνεται η γωνία ανύψωσης.

Υπάρχουν δύο χαρακτηριστικοί τύποι ανεμοπτέρων έλξης: ο παθητικός και ο δυναμικός. Τα παθητικά στοιχεία έχουν σχεδιαστεί για να παρασύρονται με την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ τα δυναμικά εμπλέκονται σε μοτίβα ενεργητικής κίνησης, όπως τροχιές τύπου « οκτώ», για να μεγιστοποιήσουν την ανύψωση. Αυτή η ενεργή κίνηση επιτρέπει στα δυναμικά ανεμόπτερα έλξης να παράγουν αποτελεσματική ώθηση, ιδιαίτερα σε συνθήκες κατάντη ανέμου, αν και η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται σε χαμηλότερες γωνίες ανέμου. Τα παθητικά ανεμόπτερα έλξης επηρεάζονται λιγότερο από τις αλλαγές στη γωνία του ανέμου.

Τα μεγέθη των ανεμόπτερων έλξης στις θαλάσσιες εφαρμογές ποικίλλουν. Τα μικρά ανεμόπτερα έλξης για σκάφη αναψυχής και αλιείας κυμαίνονται από 10 έως 40 τετραγωνικά μέτρα. Για την εμπορική ναυτιλία, το μεγαλύτερο επιχειρησιακό ανεμόπτερο έλξης έχει έκταση 1.000 τετραγωνικών μέτρων, με σχέδια έως 5.000 τετραγωνικά μέτρα να είναι σε εξέλιξη. Αυτά τα μεγαλύτερα ανεμόπτερα έλξης θα μπορούσαν να στοιβάζονται το ένα πάνω από το άλλο για βελτιωμένο αποτέλεσμα.



Εικόνα 43: Σχηματική Απεικόνιση ανεμόπτερο έλξης (ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023)



Εικόνα 44: Σχηματική απεικόνιση σύνθετης τροχιάς ανεμόπτερου έλξης κατά τη κίνηση πλοίου. Απεικονίζονται και οι δυνάμεις που δρουν στο ανεμόπτερο

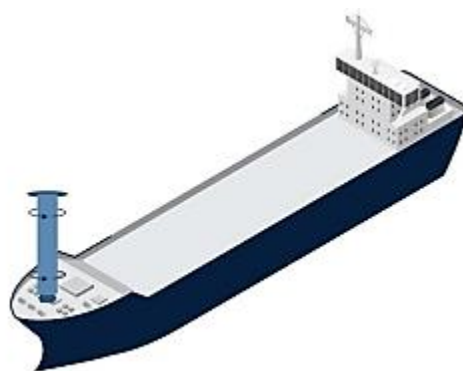
### **Πανιά ρότορα (Flettner)**

Τα πανιά ρότορα, γνωστά και ως ρότορες Flettner, είναι κυλινδρικές συσκευές που περιστρέφονται μέσω μικρών ηλεκτροκινητήρων που είναι τοποθετημένοι στο κατάστρωμα ενός πλοίου. Αυτή η περιστροφή αλληλεπιδρά με τον άνεμο για να δημιουργήσει μια διαφορά πίεσης κατά μήκος του ρότορα, αξιοποιώντας το φαινόμενο Magnus για την παραγωγή προωθητικής δύναμης κάθετη προς την κατεύθυνση του ανέμου. Για μέγιστη απόδοση, τα πανιά του ρότορα απαιτούν πλευρικό άνεμο (άνεμος δέσμης) σε κάθετη γωνία προς την πορεία του πλοίου, καθώς αυτός ο προσανατολισμός επιτρέπει τη περαιτέρω ανύψωση.

Όταν ένα πλοίο αντιμετωπίζει αντίθετο άνεμο, τα πανιά του ρότορα δεν μπορούν να παράγουν προωθητική δύναμη, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κέρδος απόδοσης, ενώ το πλεονέκτημα που προσφέρει ο ουραίος άνεμος είναι ελάχιστο λόγω της εγγενούς έλξης του ρότορα. Επιπλέον, η λειτουργία των πανιών του μπορεί να οδηγήσει σε κάποιο βαθμό κραδασμών και θορύβου, οι οποίοι πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά.

Το μέγεθος των πανιών του ρότορα ποικίλλει, με ύψη που κυμαίνονται από 18 έως 35 μέτρα και διαμέτρους που φτάνουν έως και 5 μέτρα. Αυτές οι διαστάσεις επιτρέπουν μια σημαντική επιφάνεια για την εκμετάλλευση του φαινομένου Magnus προς όφελος της πρόωσης του πλοίου.

Οι πρόσφατες εφαρμογές, όπως αυτές της Norsepower, έχουν αποδείξει σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων, αν και δεν επαρκούν για να επιτευχθούν μεμονωμένα οι στόχοι μείωσης των εκπομπών της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Η τεχνολογία ρότορα Flettner συνεχίζει να εξελίσσεται, με τη συνεχή έρευνα να επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και στην ενσωμάτωσή της σε διαφορετικούς τύπους σκαφών για τη μεγιστοποίηση των κερδών απόδοσης (Yachting World, 2023).

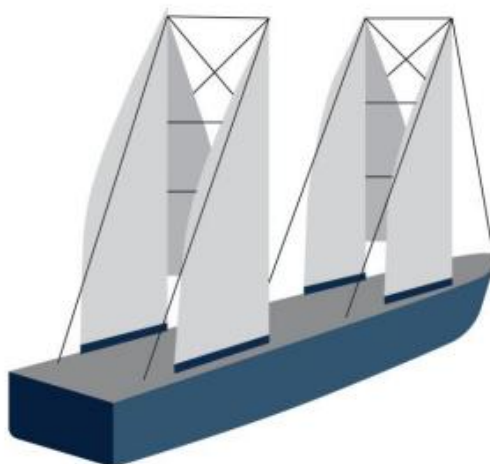


*Εικόνα 45: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ρότορα Flettner (ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023)*

### **Μαλακά πανιά (soft sails)**

Τα μαλακά πανιά είναι μια παραδοσιακή μέθοδος θαλάσσιας πρόωσης που έχει βελτιωθεί με σύγχρονα υλικά και τεχνολογίες. Όπως τα σκληρά πανιά, τα σύγχρονα μαλακά πανιά μπορούν να σχεδιαστούν με σχήμα φτερού για να μεγιστοποιήσουν τις αεροδυναμικές δυνάμεις για την πρόωση. Αυτά τα μαλακά πανιά έχουν εξελιχθεί ώστε να περιλαμβάνουν όχι μόνο τα συμβατικά σχέδια αλλά και καινοτόμες προσεγγίσεις όπως τα φουσκωτά πανιά, τα οποία μπορούν εύκολα να αναπτυχθούν ή να ανασυρθούν χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένα συστήματα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ιστοί για μαλακά πανιά έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν διπλούς σκοπούς, λειτουργώντας τόσο ως στήριγμα για πανιά όσο και ως γερανοί για τη διακίνηση φορτίου, γεγονός που συνεισφέρει στην ευελιξία των λειτουργιών του σκάφους. Αυτά τα πανιά, τα οποία έχουν δοκιμαστεί σε διάφορους τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένου ενός φορτηγού Ro-Ro, αναφέρεται ότι είναι ελαφρύτερα και προσφέρουν καλύτερες δυνατότητες αξιοποίησης αντίθετου ανέμου από τα συμβατικά μαλακά πανιά.

Παρά αυτές τις καινοτομίες, τα σκληρά πανιά έχουν αποδειχθεί πιο αποτελεσματικά σε ορισμένες συνθήκες. Η υιοθέτηση της τεχνολογίας μαλακών πανιών σε μεγάλα εμπορικά πλοία έχει υποχωρήσει, με λίγα μόνο έργα να χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνολογία. Έτσι, υποδεικνύεται μια τάση προς πιο αποτελεσματικές λύσεις, όπως τα σκληρά πανιά, στις οποίες ένας πάροχος έχει στραφεί αφού διαπίστωσε ότι σημειώνουν καλύτερες επιδόσεις.



*Εικόνα 46: Σχηματική Αναπαράσταση πλοίου με μαλακά πανιά (ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023)*

#### 4.3.6 Προκλήσεις τεχνολογίας WASP

Πολλά τεχνικά ζητήματα σχετίζονται με τη λειτουργία και την ασφάλεια της τεχνολογίας WASP στα πλοία. Αυτά περιλαμβάνουν παρεμπόδιση ορατότητας, χειρισμό φορτίου, περιορισμούς ρεύματος αέρα, δομική ακεραιότητα και σταθερότητα.

Επιλογή και σχεδιασμός πανιών: Τα πανιά πρέπει είναι ελαφριά, δομικά απλά και συμπαγή με βελτιωμένη απόδοση πρόωσης, υψηλή απόδοση αιολικής ενέργειας και ευέλικτο έλεγχο. Ανάμεσα στις βασικές απαιτήσεις είναι η προσαρμοστικότητα σε διάφορες καιρικές συνθήκες.

Σταθερότητα Πλοίων: Η πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό αυξάνεται με το WASP λόγω της αλληλεξάρτησης των παραμέτρων σχεδιασμού. Για παράδειγμα, η αύξηση της επιφάνειας των πανιών ενισχύει την ώθηση αλλά δύναται να δημιουργεί συνθήκες εκτροπής του πλοίου.

Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πανιού: Η απόδοση της τεχνολογίας WASP στα πλοία επηρεάζεται από τις καιρικές προβλέψεις, τις συνθήκες της θάλασσας και τα χαρακτηριστικά του πλοίου. Για παράδειγμα, οι χαμηλές ταχύτητες ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη εξοικονόμηση ενέργειας, ενώ οι υψηλές ταχύτητες ανέμου αυξάνουν τον κίνδυνο ανατροπής. Η βελτιστοποίηση δρομολόγησης είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία πανιών εντός ενός εύρους ταχύτητας ανέμου, που περιλαμβάνει δρομολόγηση καιρού για την εύρεση ενός κατάλληλου εξωτερικού περιβάλλοντος για το WASP.

Υπολογισμός αντιστοίχισης μεταξύ πανιών και κύριων μηχανών: Η σύγχρονη τεχνολογία υποβοηθούμενη από πανιά χρησιμοποιεί συστήματα αυτόματου ελέγχου. Ο στόχος είναι να συγχρονιστεί το πανί και η κύρια μηχανή για να μεγιστοποιηθεί η χρήση αιολικής ενέργειας, να διατηρηθούν οι κύριες συνθήκες του κινητήρα και να κατανεμηθεί το φορτίο του κινητήρα με βάση την τρέχουσα αιολική ισχύ. Οι Lu et al. ερεύνησαν τις αρχές υπολογισμού αντιστοίχισης για ολοκληρωμένα συστήματα πρόωσης πλοίων με το WASP, επιτυγχάνοντας μια μέθοδο υπολογισμού για υβριδική γεννήτρια ντίζελ/σύστημα πρόωσης αιολικού πλοίου (Lu, et al., 2023).

Τεχνολογική ολοκλήρωση και απαιτήσεις χώρου: Η ενσωμάτωση συστημάτων WASP στην υπάρχουσα υποδομή πλοίων απαιτεί προσεκτική εξέταση του φυσικού χώρου και συμβατότητα με ηλεκτρονικά συστήματα πλοήγησης και επικοινωνίας. Για παράδειγμα, οι ιστοί που υποστηρίζουν πανιά μπορούν να έχουν ύψος έως και 80 μέτρα, καταλαμβάνοντας σημαντικό χώρο στο κατάστρωμα. Αυτή η πρόκληση είναι ιδιαίτερα έντονη για τα μικρότερα σκάφη, όπως τα αλιευτικά ή τα σκάφη εσωτερικής ναυσιπλοΐας, που ενδέχεται να μην μπορούν να φιλοξενήσουν τόσο μεγάλες κατασκευές.

Σχεδιασμός και μετασκευή: Τόσο οι νέες κατασκευές όσο και τα μετασκευασμένα πλοία εν χρήσει αντιμετωπίζουν σχεδιαστικά και τεχνικά εμπόδια κατά την ενσωμάτωση συστημάτων



WASP. Η μετασκευή των υπαρχόντων σκαφών απαιτεί συχνά δομικές τροποποιήσεις για ενίσχυση, επηρεάζοντας την άγκυρα και τις αλυσίδες, τα στοιχεία σταθεροποίησης και τον εξοπλισμό διεύθυνσης. Για τις νέες κατασκευές, αυτό σημαίνει ενσωμάτωση πολλών νέων χαρακτηριστικών που διαφέρουν από τα παραδοσιακά σχέδια σκαφών (DNV, 2024).

Κόστος και απόδοση επένδυσης: Ενώ τα συστήματα WASP υπόσχονται μακροπρόθεσμα οφέλη για το περιβάλλον και την απόδοση καυσίμου, επί του παρόντος αντιπροσωπεύουν μια σημαντική επένδυση. Η έλλειψη βελτιστοποιημένης προσέγγισης για το σχεδιασμό και την ενσωμάτωσή τους αμφισβητεί την επίτευξη οικονομιών κλίμακας, διατηρώντας το κόστος σε υψηλά επίπεδα (Marine & Offshore, 2023).

Ρυθμιστικές προκλήσεις και προκλήσεις συμμόρφωσης: Επί του παρόντος, ρυθμιστικοί φορείς όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) δεν έχουν θεσπίσει επίσημους κανόνες ή κατευθυντήριες γραμμές για τα συστήματα WASP. Η συμμόρφωση και τα συγκεκριμένα κριτήρια για εμπορικά πλοία αξιολογούνται κατά περίπτωση, κάτι που απαιτεί προσαρμογές στα ισχύοντα ρυθμιστικά πλαίσια.

Εκπαίδευση και διαχείριση πληρώματος: Η λειτουργία πλοίων εξοπλισμένων με WASP απαιτεί εξειδικευμένη εκπαίδευση του πληρώματος. Η διαχείριση αυτών των τεχνολογιών απαιτεί ένα νέο σύνολο δεξιοτήτων και μια νέα βάση γνώσεων, δεδομένων των πολυπλοκοτήτων και των αποχρώσεων της λειτουργίας συστημάτων που υποστηρίζονται από τον άνεμο.

Συντήρηση και ανθεκτικότητα σε θαλάσσια περιβάλλοντα: Η διασφάλιση της ανθεκτικότητας των πανιών και των σχετικών μηχανισμών έναντι σκληρών θαλάσσιων συνθηκών όπως το αλμυρό νερό, ο άνεμος και η έκθεση στον ήλιο είναι ζωτικής σημασίας. Αυτή η πρόκληση ενισχύεται από την ανάγκη για τακτική συντήρηση και την πιθανότητα φθοράς σε αυτά τα περιβάλλοντα (International Chamber of Shipping, 2023).

Προκλήσεις αντίληψης και χρηματοδότησης: Η ευρύτερη υιοθέτηση του WASP εμποδίζεται από την αντίληψη του κλάδου και την έλλειψη βασικής χρηματοδότησης. Αυτό επηρεάζει την εμπιστοσύνη της αγοράς στην τεχνολογία και την απόδοση εξοικονόμησης καυσίμων και αερίων θερμοκηπίου (GHG).

Διαθεσιμότητα του ανέμου ως πηγή ενέργειας: Ο άνεμος είναι ανανεώσιμος αλλά μεταβλητός, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, τη γεωγραφική περιοχή και την κατεύθυνση του σκάφους. Αυτή η μεταβλητότητα σημαίνει ότι η αιολική πρόωση από μόνη της μπορεί να μην καλύψει με συνέπεια τις ανάγκες ισχύος των πλοίων, οδηγώντας στην αναγκαιότητα υβριδικών συστημάτων πρόωσης.

#### 4.3.7 Τρέχουσες και προγραμματισμένες εφαρμογές (WASP)

Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει μια επισκόπηση των εταιρειών που παρέχουν ή αναπτύσσουν επί του παρόντος συστήματα αιολικής πρόωσης (WASP) μαζί με τον αριθμό των πλοίων που έχουν εξοπλιστεί με τέτοια συστήματα μέχρι στιγμής. Λόγω της τρέχουσας δυναμικής αυτής της τεχνολογίας και της αγοράς, αυτή η επισκόπηση ενδέχεται να μην είναι συνολική.

Μέχρι τα μέσα του 2023, τα WAPS έχουν εγκατασταθεί σε 30 πλοία και σχεδιάζεται να εγκατασταθούν ή βρίσκονται επί του παρόντος σε άλλα 26 πλοία. Τα 16 από αυτά τα πλοία είναι νεότευκτα, ενώ τα 38 μετασκευάζονται.

Με περισσότερες λεπτομέρειες:

- Δέκα πλοία έχουν εξοπλιστεί εκ των υστέρων με πανιά ρότορα (πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, πλοία γενικού φορτίου, πλοία Ro-Ro, ferries και ένα δεξαμενόπλοιο). Δύο νεότευκτα πλοία, ένα Ro-Ro/Lo-Lo και ένα δεξαμενόπλοιο VLCC έχουν εξοπλιστεί επίσης με πανιά ρότορα. Ένα φορτηγό χύδην φορτίου είναι έτοιμο, αλλά το πανί του ρότορα δεν έχει ακόμη εγκατασταθεί. Αυτήν τη στιγμή είναι σε παραγγελία πλοία με πανιά ρότορα (3 πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, 2 δεξαμενόπλοια, 1 πλοίο Ro-Ro, 1 μεταφορέας συνδυασμού) και νέες κατασκευές (3 πλοία μεταφοράς αερίου, 1 πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου).
- Οκτώ πλοία έχουν εξοπλιστεί εκ των υστέρων με πτερύγια αναρρόφησης (1 αλιευτικό, 4 πλοία γενικού φορτίου, 1 σκάφος Ro-Ro, 1 μεταφοράς τσιμέντου), ένα εκ των οποίων ως μέρος πιλοτικού έργου σε πλοίο που χρησιμοποιείται ως θέατρο. Πέντε άλλα πλοία βρίσκονται επί του παρόντος ή πρόκειται να εξοπλιστούν εκ των υστέρων με πτερύγια αναρρόφησης (1 πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου, 1 δεξαμενόπλοιο χημικών, 1 τροφοδότη εμπορευματοκιβωτίων και 2 πλοία γενικού φορτίου).
- Έχουν τοποθετηθεί σκληρά πανιά σε επτά πλοία: Ένα εκ των υστέρων ως μέρος ενός πιλοτικού έργου (καταμαράν), δύο εκ των υστέρων σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και τέσσερα νεότευκτα (2 VLCC, 1 πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου και ένα πιλοτικό έργο για επιβατηγό/οχηματαγωγό πλοίο). Έξι άλλα πλοία πρόκειται να εξοπλιστούν με σκληρά πανιά: ένα εκ των υστέρων ως μέρος ενός πιλοτικού έργου (Ro-Ro) και πέντε εφαρμογές σε νεότευκτα (1 πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου), δύο πιλοτικά έργα (πλοία φορτίου) και δύο ακόμα (κρουαζιέρα/μεγάλη αυλή).
- Μέχρι στιγμής, ένα ανεμόπτερο έλξης έχει εγκατασταθεί σε πλοίο Ro-Ro ως μέρος πιλοτικού έργου και ένα ακόμα έχει τοποθετηθεί εκ των υστέρων σε πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου. Ανακοινώθηκαν τέσσερις επιπλέον αιτήσεις σε πλοία

μεταφοράς χύδην φορτίου. Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει τη λεπτομερή επισκόπηση των παραπάνω. Ο κατάλογος των συστημάτων που φαίνεται παρακάτω προορίζεται να περιλαμβάνει εγκαταστάσεις σε μεγάλα εμπορικά πλοία ή εγκαταστάσεις σε μικρότερα πλοία συγκεκριμένων συστημάτων που έχουν/προβλεφθεί να εγκατασταθούν και σε μεγαλύτερα εμπορικά πλοία.

Πίνακας 9: Επισκόπηση συστημάτων αιολικής πρόωσης (WASP) που εφαρμόζονται επί του παρόντος

Τεχνολογία	Όνομα εταιρείας	Όνομα έργου	Πραγματικές υλοποιήσεις – αριθμός πλοίων	Κράτος
Rotor Sails	Anemoi	Rotor Sails	2	UK
	Dealfeng	Dealfeng Rotor Sail System	0	China
	Enercon	Enercon	1	Germany
	Magnuss	VOSS	0	Sweden
	MariGreen	Eco Flettner	2	Germany
	Norsepower	Norsepower Rotor Sail	7	Finland
	bound4blue	eSAIL	3	Spain
Suction wings	Crain	Suction Wing SW270	0	France
	Econowind	VentiFoil, Ventofoil	5	Netherlands
	AYRO	Oceanwings	1	France
	BarTech, Yara Marine	WindWing	2	Norway
	bound4blue	eSAIL	0	Spain
Hard sails	Chantier de L'Atlantique	SolidSail	0	France
	CWS	Computed Wing Sail	0	France
	DSIC	DSIC	0	China
	Eco marine power	Aquarius MRE	0	Japan
	MOL	Wind Challenger	1	Japan
	NAOS Design	Wind Sail Module	1	Italy
	Nayam	Nayam Wings	0	Israel
	Wallenius	Oceanbird	0	Sweden
	Windship Technology	Windship	0	UK
	Zéphyr & Borée	Windcoop	0	France
Kite	Airseas	Seawing	2	France
	Beyond the Sea	LibertyKite	0	France
	Bluewater Engineering	SKYTUG	0	UK
Soft Sail	Michelin	WISAMO sail	1	France
Hull Sail	Lade AS	Vindskip	0	Norway

#### 4.3.8 Οικονομική αξιολόγηση και εξοικονόμηση καυσίμου με WASP

Όπως έχει αναφερθεί ήδη η ναυτιλία ως μια ενεργοβόρα βιομηχανία συνεπάγεται σημαντικό κόστος καυσίμων, το οποίο αποτελεί μεγάλο μέρος των λειτουργικών και συνολικών εξόδων ενός πλοίου (Brown, 2001) (Jafarzadeh, et al., 2014). Η βελτιωμένη απόδοση καυσίμου όχι μόνο ενισχύει την αναμενόμενη κερδοφορία ενός πλοίου, αλλά χρησιμεύει επίσης ως λειτουργική ασφάλεια έναντι των διακυμάνσεων των τιμών των καυσίμων. Για παράδειγμα, σε άλλους τομείς μεταφορών, ιδιαίτερα στις αερομεταφορές, οι επιχειρησιακές στρατηγικές αντιστάθμισης κινδύνου, όπως η σύνθεση του στόλου και η αποδοτικότητα των καυσίμων, έχουν αποδειχθεί πιο αποτελεσματικές στον μετριασμό των κινδύνων τιμών των καυσίμων από τα παράγωγα μέσα (Treanor, et al., 2014). Στον ναυτιλιακό τομέα, όπου οι τιμές των καυσίμων έχουν διακυμανθεί δραματικά, μεταξύ 100 και 600 USD ανά τόνο από το 2014 έως το 2019, η τεχνολογία WASP μπορεί να παρέχει στους πλοιοκτήτες αντιστάθμιση έναντι αυτών των χρηματοοικονομικών κινδύνων.

Οι παραγωγοί της τεχνολογίας WASP τονίζουν τη σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου ως βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων τους. Αυτό φάνηκε στο GST 2020 International Wind Propulsion for Shipping Forum στην Κοπεγχάγη, τον Μάρτιο του 2020, όπου οι πλοιοκτήτες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία WASP τόνισαν τα οικονομικά πλεονεκτήματα των επενδύσεών τους (IWSA, 2020). Αναφέρθηκε ότι η μείωση των εκπομπών από μόνη της δεν αποτελεί επαρκή λόγο για επενδύσεις στο WASP, δεδομένων των σημαντικών κεφαλαιακών αναγκών και λειτουργικών κινδύνων που εμπεριέχονται. Χρειάζεται να παρουσιαστεί μια πιο ολοκληρωμένη οικονομική υπόθεση, διασφαλίζοντας ότι τα πιθανά οικονομικά οφέλη υπερτερούν του κόστους και των κινδύνων.

Απαιτείται περαιτέρω έρευνα σχετικά με την οικονομική σκοπιμότητα των επενδύσεων WASP και τον αντίκτυπό τους στις ναυτιλιακές δραστηριότητες, παρά την αυξανόμενη επιστημονική δραστηριότητα γύρω από αυτή την τεχνολογία. Οι περισσότερες τρέχουσες μελέτες χρησιμοποιούν μια προσέγγιση προσομοίωσης από την πλευρά του πλοίου σε βήματα:

- Παραμετροποίηση της φυσικής ενός υποβοηθούμενου από τον αέρα πλοίου και της τεχνολογίας WASP του.
- Παραμετροποίηση της απόδοσης ενός υποβοηθούμενου από τον αέρα πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβλητότητα του καιρού.
- Συγκέντρωση δεδομένων απόδοσης από πολλαπλές προσομοιώσεις.

Ο στόχος αυτών των προσομοιώσεων είναι να ποσοτικοποιηθεί η συμβολή της αιολικής ενέργειας στην πρόωση των πλοίων. Ενώ οι βασικές διαδικασίες είναι παρόμοιες σε όλες τις

μελέτες, προκύπτουν διαφορές στις μεθοδολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται. Μεταξύ αυτών των μελετών, παρατηρούνται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις:

- Προσομοιώσεις που δεν βασίζονται σε διαδρομές, οι οποίες βασίζονται σε υποθέσεις σχετικά με τις παραμέτρους τεχνολογιών μοντελοποίησης πλοίων και καιρικών συνθηκών από τη βιβλιογραφία και τις βάσεις δεδομένων, υπολογίζουν την καθαρή παραγωγή ενέργειας των τεχνολογιών σε ένα μοντέλο προσομοίωσης και μετατρέπουν αυτήν την έξοδο με σκοπό την εξοικονόμηση καυσίμων (De Marco, et al., 2016) (Leloup, et al., 2016) (Naaijen,, et al., 2006) (Auxiliary kite propulsion contribution to ship thrust, 2013).
- Προσομοιώσεις βασισμένες σε διαδρομή, οι οποίες, εκτός από την πρώτη προσέγγιση, ανασυνθέτουν συγκεκριμένες διαδρομές από τα δεδομένα του Συστήματος Αυτόματου Αναγνώρισης (AIS) των πλοίων και λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες ανέμου σε κάθε ταξίδι (Traut, et al., 2014) (Comer, et al., 2019) (Smith, et al., 2013) (Bentin,, et al., 2016).
- Προσεγγίσεις που βασίζονται όχι μόνο σε προσομοιώσεις αλλά και σε δεδομένα πραγματικής μετρούμενης κατανάλωσης καυσίμου από πλοία εξοπλισμένα με τεχνολογία WASP. Η εξοικονόμηση καυσίμου καθορίζεται με την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση της τεχνολογίας σε ίδιες συνθήκες θάλασσας και ανέμου και συγκρίνοντας την κατανάλωση καυσίμου (DNV GL, 2020).

Η χρήση παραμετρικών προσομοιώσεων έχει πολλά πλεονεκτήματα:

- Επιτρέπει την αποτελεσματική μελέτη διαφόρων τεχνολογιών, τύπων πλοίων και συνθηκών.
- Δεν περιορίζεται από τις υπάρχουσες προδιαγραφές των διαθέσιμων τεχνολογιών, επιτρέποντας περισσότερες πειραματικές μελέτες.
- Επιτρέπει μια λεπτομερή και δυναμική μελέτη διαφορετικών παραμέτρων.

Ωστόσο, η έλλειψη επαληθεύσιμων μελετών που έχουν διεξαχθεί σε πραγματικές συνθήκες αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα. Χωρίς πραγματικά δεδομένα, είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί η πληρότητα των προσομοιώσεων και εάν έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι σχετικές μεταβλητές.

Η χρήση διαφορετικών παραμέτρων σε αυτές τις μελέτες, όπως οι προδιαγραφές τεχνολογίας, οι τύποι πλοίων, οι συνθήκες ανέμου και οι διαδρομές, καθιστούν τις άμεσες συγκρίσεις δύσκολες. Για παράδειγμα, παραμετρική μελέτη δείχνει ότι για πλοία εξοπλισμένα με ρότορα Flettner, πτυχές όπως η διάμετρος, το ύψος, η ταχύτητα περιστροφής, η τοποθεσία εγκατάστασης και η μέση ταχύτητα ταξιδιού μπορούν να

επηρεάσουν σημαντικά την εξοικονόμηση καυσίμου (Lu , et al., 2020). Εκτός από την πιθανή εξοικονόμηση καυσίμου, αυτές οι μελέτες αποκαλύπτουν επίσης αρκετούς γενικούς και ειδικούς για την τεχνολογία παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογιών WASP.

#### 4.3.9 Τεχνολογική ετοιμότητα συστημάτων WASP

Σε αυτή τη παράγραφο, γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης της τεχνολογικής ετοιμότητας των συστημάτων αιολικής πρόωσης, κατηγοριοποιώντας τα σε τρία επίπεδα: «ώριμα», «σχεδόν ώριμα» και «μη ώριμα». Οι «ώριμες» τεχνολογίες είναι οι πιο προηγμένες, φθάνοντας σε Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL) 9. Αυτό σημαίνει ότι αυτά τα συστήματα έχουν αναπτυχθεί πλήρως και έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά σε λειτουργικές ρυθμίσεις. Τέτοια ώριμα συστήματα αιολικής πρόωσης εφαρμόζονται ήδη σε πλοία, είτε ως μέρος μίας νέας κατασκευής είτε ως μετασκευές σε υπάρχοντα πλοία, και έχουν μόνιμη χρήση. Οι «σχεδόν ώριμες» τεχνολογίες, που χαρακτηρίζονται από TRL 7 ή 8, είναι εκείνες που έχουν δοκιμαστεί ή χρησιμοποιηθεί επιχειρησιακά, είτε σε επιδείξεις είτε σε πιλοτικά έργα, αλλά εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν ορισμένες προκλήσεις που εμποδίζουν την είσοδό τους στην αγορά. Τέλος, οι «μη ώριμες» τεχνολογίες είναι εκείνες που δεν έχουν ακόμη εφαρμοστεί ή δοκιμαστεί σε λειτουργικά περιβάλλοντα πραγματικού κόσμου, που συνήθως συνδέονται με TRL 6 ή χαμηλότερο.

#### Όριμες τεχνολογίες

Τα σκληρά πανιά, τα φτερά αναρρόφησης και τα πανιά ρότορα έχουν καθιερωθεί ως τεχνολογικά ώριμα. Αυτά τα υποβοηθούμενα από τον αέρα συστήματα πρόωσης έχουν τοποθετηθεί σε διάφορα πλοία, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά τους. Παρά τον σχετικά μικρό αριθμό εγκαταστάσεων, η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών αυξάνεται. Πολλές εταιρείες έχουν αναπτύξει με επιτυχία αυτές τις τεχνολογίες σε ένα ώριμο στάδιο. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο ότι αρκετοί από αυτούς τους παρόχους τεχνολογίας εξακολουθούν να βασίζονται σε εξωτερική χρηματοδότηση για την παραγωγή και την επέκταση της παραγωγικής ικανότητας.

Οι αρχικές εγκαταστάσεις δύο εταιρειών το 2015 και το 2017 επιβεβαίωσαν την πλήρη ωριμότητα αυτής της τεχνολογίας, ωθώντας την αύξηση της διαθεσιμότητάς της. Εκτός από ένα νέο πλοίο που κατασκευάστηκε με πανιά ρότορα από το 2010, όλα τα άλλα έχουν μετασκευαστεί με αυτά.

Δεκατρείς εγκαταστάσεις συστημάτων αιολικής πρόωσης είναι μοντέλα με πτερύγια αναρρόφησης, που χαρακτηρίζονται από ταχεία ανάπτυξη, με όλες τις εγκαταστάσεις να πραγματοποιούνται μετά το 2020. Τα φτερά αναρρόφησης, που έχουν εγκατασταθεί κυρίως σε φορτηγά πλοία, έχουν όλα μετασκευαστεί.

Υπάρχουν δεκατρία πλοία υποβοηθούμενα από τον άνεμο εξοπλισμένα με σκληρά πανιά, κυρίως με πτερύγια. Οι προμηθευτές ποικίλλουν ως προς τα σχέδιά τους, προσφέροντας τόσο πτυσσόμενα όσο και μη πτυσσόμενα πανιά. Σε αντίθεση με τα πανιά ρότορα και τα φτερά αναρρόφησης, τα οποία γενικά παρέχονται από περιορισμένο αριθμό εταιρειών, τα σκληρά πανιά προσφέρονται από ένα ευρύτερο φάσμα κατασκευαστών. Κάθε εταιρεία έχει τυπικά εγκαταστήσει την τεχνολογία της σε ένα ή δύο πλοία, αντανακλώντας ένα ελαφρώς λιγότερο προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης σε σύγκριση με τα φτερά αναρρόφησης και τα πανιά ρότορα.

*Πίνακας 10: Αριθμός ολοκληρωμένων ή προγραμματισμένων συστημάτων αιολικής πρόωσης ανά τεχνολογία; εταιρείες που έχουν εφαρμόσει τεχνολογία αιολικής πρόωσης και εταιρείες που δραστηριοποιούνται (αλλά όχι απαραίτητα με ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις) ανά τεχνολογία (ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023)*

Τεχνολογία	Ολοκληρωμένες/προγραμματισμένες εγκαταστάσεις	Εταιρείες που έχουν ολοκληρώσει εγκαταστάσεις	Συνολικές εταιρείες ενεργές στην τεχνολογία
Rotor Sail	23	4	6
Suction wing	13	2	3
Hard sail	13	5	13
Kite	6	1	2
Soft sail	1	1	3
Hull design	0	0	1
<b>Σύνολο</b>	<b>56</b>	<b>13</b>	<b>28</b>



### **Σχεδόν ώριμες τεχνολογίες**

Τα σύγχρονα συστήματα μαλακών πανιών και τα ανεμόπτερα έλξης έχουν υποβληθεί σε δοκιμές, υποδεικνύοντας υψηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξή τους σε πλήρη κλίμακα παραμένει περιορισμένη, υποδηλώνοντας ένα αναπτυξιακό στάδιο που δεν είναι τόσο προχωρημένο όσο αυτό των σκληρών πανιών, των πτερυγίων αναρρόφησης ή των πανιών ρότορα:

- Τα σύγχρονα συστήματα μαλακών πανιών, συγκεκριμένα το DynaRig, έχουν εφαρμοστεί σε δύο σούπερ γιοτ για αιολική πρόωση. Ωστόσο, δεν έχουν πραγματοποιηθεί πιλοτικά έργα για μεγάλα πλοία θαλάσσιων μεταφορών. Μια ερευνητική εταιρεία πρόσφατα μετατόπισε την εστίασή της από την τεχνολογία μαλακών πανιών στην τεχνολογία σκληρού πανιού, η οποία αναμένεται να προσφέρει παρόμοια ή βελτιωμένη απόδοση με μειωμένο κόστος συντήρησης (Neoline, 2022). Επιπλέον, μια νέα τεχνολογία μαλακών πανιών (WISAMO) έχει προγραμματιστεί για δοκιμή σε σκάφος Roll-on/Roll-off (RoRo) από τον Σεπτέμβριο του 2023 (Ferry Shipping News, 2023).
- Η πρώτη πλήρους κλίμακας εφαρμογή ενός συστήματος πρόωσης ανεμόπτερου έλξης ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2022, με προγραμματισμένες αρκετές επιπλέον εγκαταστάσεις. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι εφαρμογές χαρταετού επί του παρόντος εξαρτώνται από κρατικές επιδοτήσεις.

### **Μη ώριμες τεχνολογίες**

Στις κατηγορίες αιολικής πρόωσης, η σχεδίαση του κύτους του πλοίου με τρόπο που μοιάζει με συμμετρική αεροτομή δεν έχει υλοποιηθεί (hull design). Υπάρχουν δύο βασικά εμπόδια: πρώτον, τα πανιά του κύτους απαιτούν ένα σκάφος ειδικά σχεδιασμένο για αυτήν την τεχνολογία, καθιστώντας το εφαρμόσιμο μόνο σε νέες κατασκευές πλοίων. Δεύτερον, αυτή τη στιγμή, μόνο μία εταιρεία ερευνά ενεργά αυτήν την τεχνολογία. Λόγω αυτών των περιορισμών για τη συγκεκριμένη τεχνολογία δεν δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα σε αυτή τη μελέτη.

#### 4.3.10 Τεχνολογία WASP για τη μείωση των εκπομπών

Επί του παρόντος, οι επαγγελματίες του κλάδου της ναυτιλίας και οι ερευνητές από συναφή ιδρύματα εστιάζουν ολοένα και περισσότερο στην τεχνολογία πλοήγησης που υποστηρίζεται από τον άνεμο. Αυτό το αυξανόμενο ενδιαφέρον έχει οδηγήσει σε πληθώρα πειραματικών δεδομένων. Αναλυτικά στον Πίνακα 10, αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν την εξοικονόμηση καυσίμου και τις μειώσεις εκπομπών από συστήματα πλοήγησης που υποστηρίζονται από τον άνεμο, προέρχονται από μια ολοκληρωμένη ανάλυση έρευνας προσομοίωσης, πραγματικών πλοίων, τεχνικών ευρημάτων από σχετικές και ευρήματα από διάφορες ερευνητικές εργασίες.

Τα πανιά ρότορα και τα ανεμόπτερα έλξης είναι οι δύο τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί και έχουν εφαρμοσθεί σε πραγματικές συνθήκες έχοντας προσελκύσει όμως και σημαντική θεωρητική έρευνα. Τα πανιά του ρότορα επιδεικνύουν ικανότητα εξοικονόμησης καυσίμου που επηρεάζεται λιγότερο από την πορεία του πλοίου και τις καιρικές συνθήκες. Αντίθετα, τα ανεμόπτερα έλξης υπερέχουν στην απόδοση καυσίμου, κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να εκμεταλλεύονται ισχυρότερους ανέμους σε μεγαλύτερα υψόμετρα και να δημιουργούν χαμηλότερες ροπές εγκάρσιας κλίσης. Όσον αφορά την επεκτασιμότητα, στα πανιά ρότορα το ύψος και η διάμετρός τους μπορούν να αυξηθούν ή ο αριθμός τους μπορεί να πολλαπλασιαστεί αναλογικά με το μέγεθος του πλοίου, με μια γραμμικά αναμενόμενη αύξηση της συμβολής στην ισχύ. Ενώ τα ανεμόπτερα έλξης είναι λιγότερο επεκτάσιμα, η ελάχιστη απαίτηση χώρου στο κατάστρωμα εξακολουθεί να τα κάνει ελκυστικά, ιδιαίτερα για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

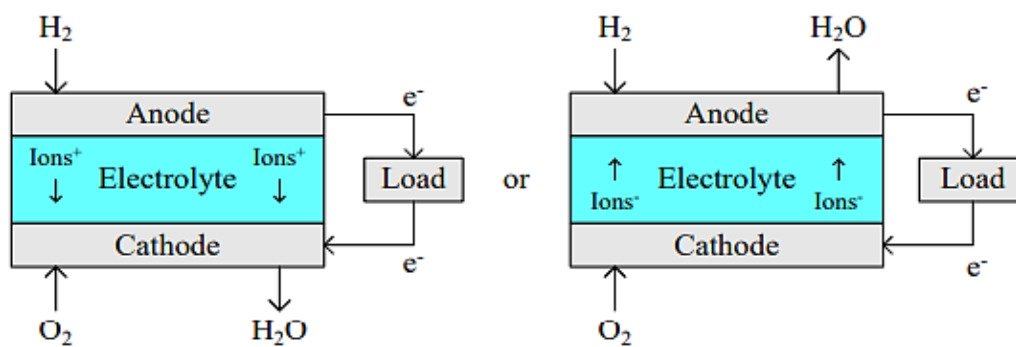
Δεδομένου ότι η λειτουργική απόδοση κάθε συστήματος πλοήγησης με αιολική υποβοήθηση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και λαμβάνοντας υπόψη ότι η τρέχουσα βιβλιογραφία δεν έχει ακόμη εντοπίσει μια τεχνικά ανώτερη διαμόρφωση, η κατασκευή ενός συστήματος πρόβλεψης και αξιολόγησης για την απόδοση της τεχνολογίας WASP αποτελεί πρόκληση. Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να λάβει υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, τα εμπορικά μοτίβα, οι γεωγραφικές περιοχές, οι εποχιακές επιπτώσεις, οι εκτιμήσεις εμβέλειας (τόσο μεγάλης όσο και μικρής), οι γενικεύσεις και οι περιορισμοί λειτουργίας του πλοίου και η βελτιστοποίηση διαδρομής. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητες περισσότερες εφαρμογές σε πραγματικό πλοίο και πειράματα προσομοίωσης (Wang, et al., 2022).

Πίνακας 11: Δεδομένα μείωσης κατανάλωσης καυσίμου σε πραγματικά πλοία με WASP (Wang, et al., 2022)

Όνομα Πλοίου	Παράμετροι Απόδοσης	Τύπος Πλοίου	Διαδρομή	Εξοικονόμηση Καυσίμου
Afros	4 rotor sails 16m x 2m	64000DWT Ultra Large Bulk Carrier	Nantong to Vancouver	12.5%
Axios	4 rotor sails 25.4m x 3.5m	82000DWT Kamsarmax bulk carrier	Kamara jar to Paranagua	12%
Estraden	2 rotor sails 18m x 3m	9000 DWT Cargo Ship	Netherlands to United Kingdom	6.1%
Timberwolf	2 rotor sails 30m x 5m	110000DWT tanker	Tanjung Pelepas to Ain Sukhna	8.2%
SC Connector	2 rotor sails 35m x 5m	8843DWT Ro-Ro vessel	Risavika to Aarhus	25%
Michael	SKS160 Kite System	3560DWT Cargo Ship	Indeterminate	10-15%
eConowind unit	2 wing sails 13.3m x 2.44m	Modular arrangement	Indeterminate	10-20%
Kaiii	2 wing sails 39.68m x 4.18m	308000DWT Tanker	Indeterminate	5-16%

#### 4.4 Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή μετατροπής ενέργειας που μετατρέπει τη χημική ενέργεια από ένα καύσιμο σε ηλεκτρική μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Περιλαμβάνει μια άνοδο, μια κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη. Η Εικόνα 47 παρέχει μια βασική σχηματική αναπαράσταση μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, που απεικονίζει τους διάφορους μηχανισμούς μεταφοράς ιόντων στον ηλεκτρολύτη, οι οποίοι διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης καυσίμου. Μια μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου παράγει ένα μέτριο ηλεκτρικό δυναμικό, περίπου 0,7 βολτ (V). Για να επιτευχθεί η απαραίτητη τάση για πρακτικές εφαρμογές, πολλαπλές κυψέλες τοποθετούνται σε σειρά, σχηματίζοντας μια «στοιβάδα κυψελών καυσίμου». Οι κυψέλες καυσίμου κατηγοριοποιούνται γενικά ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν.



Εικόνα 47: Βασικό σχηματικό διάγραμμα κυψέλης καυσίμου υδρογόνου.

(i) AFC (Alkaline Fuel Cell): Το AFC είναι σχετικά οικονομικό σύστημα και παράγει μόνο νερό ως υποπροϊόν, χωρίς άλλες εκπομπές. Ωστόσο, η δηλητηρίαση από  $\text{CO}_2$  παραμένει μια σημαντική πρόκληση, καθώς το  $\text{CO}_2$  μπορεί να αντιδράσει με τον αλκαλικό ηλεκτρολύτη. Επομένως, η χρήση καθαρού υδρογόνου και οξυγόνου ( $\text{O}_2$ ) είναι απαραίτητη, καθώς η εισαγωγή άλλων καυσίμων ή αέρα θα απαιτούσε εκτεταμένα μέτρα καθαρισμού λόγω της ευαισθησίας στο  $\text{CO}_2$  (Tronstad, et al., 2017).

(ii) PEMFC (Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων): Τα PEMFC λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που διευκολύνει την ευέλικτη και ασφαλή λειτουργία, μειώνει τις απαιτήσεις υλικού και επιτρέπει τη γρήγορη εκκίνηση. Ωστόσο, η χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας περιορίζει τις ευκαιρίες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας και εισάγει ένα πολύπλοκο σύστημα διαχείρισης νερού (Van Biert, et al., 2016). Η διαχείριση της υγρασίας της παροχής αέρα και η εξάλειψη της περίσσειας νερού από την κάθοδο είναι σημαντικές τεχνικές προκλήσεις. Επιπλέον, οι καταλύτες πλατίνας, αν και αποτελεσματικοί, συμβάλλουν στο συνολικό κόστος του συστήματος και είναι επιρρεπείς σε δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}$ ) και θείο ( $\text{S}$ ). Ως εκ τούτου, μια μονάδα αναμόρφωσης και καθαρισμού είναι απαραίτητη όταν χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες αντί για καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο.

(iii) HT-PEMFC (Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας): Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας PEMFC επικεντρώνεται στην ενίσχυση της λειτουργικής ευελιξίας, στην παράταση της διάρκειας ζωής και στη μείωση του κόστους. Σε αυτό το πλαίσιο, τα συστήματα PEMFC υψηλής θερμοκρασίας έχουν αναδειχθεί ως ένας αξιοσημείωτος τομέας έρευνας (Rosli, et al., 2017). Το HT-PEMFC, χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρολύτη με βάση άλατα οξέων αντί για έναν με βάση το νερό, λειτουργεί σε θερμοκρασίες έως και  $200^\circ\text{C}$ . Η αυξημένη θερμοκρασία προσδίδει μειωμένη ευαισθησία στη

δηλητηρίαση από CO και S, αναιρώντας την ανάγκη για διαχείριση του νερού. Επιπλέον, η ενσωμάτωση ενός συστήματος ανάκτησης αποβαλλόμενης θερμότητας (WHR) είναι εφικτό για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.

(iv) PAFC (Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος): Λειτουργώντας σε θερμοκρασίες έως 200°C, το PAFC έχει μέτριο κόστος και μπορεί να χρησιμοποιεί μια ποικιλία καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων υδρογονανθράκων όπως το LNG και η μεθανόλη. Συχνά ενσωματώνει τόσο μια μονάδα αναμόρφωσης για την επεξεργασία αυτών των καυσίμων όσο και ένα σύστημα WHR - συνήθως έναν ατμοστρόβιλο (Tronstad, et al., 2017). Αν και το κύριο προϊόν της ηλεκτροχημικής του αντίδρασης είναι το νερό, η διαδικασία αναμόρφωσης εκπέμπει CO<sub>2</sub>. Η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας μειώνει επίσης την ευπάθεια του καταλύτη πλατίνας σε δηλητηρίαση από CO και άλλες ακαθαρσίες.

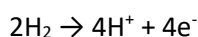
(v) DMFC (άμεση κυψέλη καυσίμου μεθανόλης): Σε σύγκριση με τα PEMFC, τα DMFC έχουν ελαφρώς υψηλότερο κόστος και προσφέρουν χαμηλότερη απόδοση. Ωστόσο, έχουν ένα πλεονέκτημα καθώς η υγρή μεθανόλη είναι πολύ πιο εύκολη στην αποθήκευση και στο χειρισμό από το υδρογόνο. Ενώ η χρήση μεθανόλης ως καυσίμου οδηγεί σε εκπομπές CO<sub>2</sub>, δεν παράγει εκπομπές NOx. Μια σημαντική πρόκληση για τα DMFC είναι η διασταύρωση της μεθανόλης μέσω της μεμβράνης στην κάθοδο όπου αντιδρά άμεσα με το οξυγόνο, οδηγώντας σε μειωμένη απόδοση (Ahmed, et al., 2011). Για να γίνουν βιώσιμα τα DMFC, είναι απαραίτητη η βελτίωση της απόδοσης της μεμβράνης, καθώς θα οδηγούσε σε αυξημένη απόδοση ισχύος της στοιβάδας κυψελών καυσίμου.

(vi) MCFC (κυψέλη καυσίμου τηγμένων ανθρακικών οξειδίων): Λειτουργώντας σε υψηλές θερμοκρασίες μεταξύ 600–700°C, οι MCFC είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος. Η λειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπει τη χρήση LNG, μεθανόλης και άλλων υδρογονανθράκων, εκτός από καθαρό υδρογόνο, ως καύσιμο. Όταν χρησιμοποιείται υδρογόνο, το σύστημα δεν εκπέμπει CO<sub>2</sub>, καθώς το παραγόμενο CO<sub>2</sub> κυκλοφορεί εντός της κυψέλης καυσίμου, βοηθώντας στην αναγέννηση των ανθρακικών. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιούνται υδρογονάνθρακες, εμφανίζονται εκπομπές CO<sub>2</sub>, ενώ εκπομπές NOx απουσιάζουν, καθώς ο αέρας δεν εμπλέκεται στη διαδικασία αναμόρφωσης της ανόδου. Ωστόσο, οι εκπομπές NOx ενδέχεται να προκύψουν από μεταγενέστερα συστήματα WHR. Παρά αυτούς τους παράγοντες, οι MCFC είναι γνωστοί για την υψηλή τους απόδοση, τους οικονομικούς καταλύτες και ηλεκτρολύτες τους και την ανθεκτικότητά τους έναντι ακαθαρσιών καυσίμου. Ενώ η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους ευνοεί τα συστήματα ανάκτησης ενέργειας, εκθέτει επίσης τα συστήματα MCFC σε προκλήσεις όπως η διάβρωση και η ρηγματώση. Οι MCFC παρουσιάζουν αργή εκκίνηση και είναι λιγότερο προσαρμόσιμοι στις κυμαινόμενες

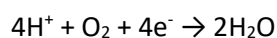
απαιτήσεις ισχύος σε σύγκριση με κυψέλες καυσίμου χαμηλότερης θερμοκρασία (Tronstad, et al., 2017). Η ενσωμάτωση MCFC με λύσεις αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ή υπερπυκνωτές, ή ηλεκτρολύτες, θα μπορούσε να μειώσει την καταπόνηση του θερμικού κύκλου και να παρέχει μια πιο σταθερή λειτουργία. Αυτή η ενοποίηση θα μπορούσε επίσης να προσφέρει ταχύτερες εκκινήσεις και τη δυνατότητα κάλυψης μεταβλητών απαιτήσεων ισχύος. Οι MCFC είναι εμπορικά διαθέσιμοι, αλλά εμποδίζονται από το υψηλό κόστος, την περιορισμένη διάρκεια ζωής και τη χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος (Van Biert, et al., 2016).

(vii) SOFC (Solid Oxide Fuel Cell): Τα SOFC δεν απαιτούν κυκλοφορία CO<sub>2</sub> στην κάθοδο, σε αντίθεση με τα MCFC. Είναι σχετικά ακριβά και λειτουργούν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 500–1000°C. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν την άμεση εσωτερική αναμόρφωση των υδρογονανθράκων, όπως το LNG και η μεθανόλη, ακόμη και την άμεση θερμική πυρόλυση της αμμωνίας (NH<sub>3</sub>) εντός της στοιβάδας SOFC. Ένα σύστημα WHR μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για SOFC αναπτύσσοντας όμως παρόμοιες ευπάθειες σε υψηλή θερμοκρασία με τους MCFC. Η σύζευξη ενός SOFC με μια μπαταρία μπορεί να μειώσει τη θερμική καταπόνηση και να επιτρέψει πιο ευέλικτη λειτουργία. Για SOFC με ηλεκτρολύτες αγωγιμότητας ιόντων οξυγόνου (SOFC-O), οι χημικές αντιδράσεις είναι ίδιες όπως με τα καύσιμα υδρογόνου ή υδρογονάνθρακα. Ωστόσο, με τους ηλεκτρολύτες που φέρουν πρωτόνια (SOFC-H), οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι οι εξής:

Αντίδραση Ανόδου:



Αντίδραση Καθόδου:



Για το SOFC-O, δημιουργούνται υδρατμοί στην άνοδο που περιέχουν N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O και υπολειμματικά NH<sub>3</sub> και H<sub>2</sub>. Για το SOFC-H, οι υδρατμοί παράγονται στην κάθοδο, αφήνοντας N<sub>2</sub> και υπολείμματα NH<sub>3</sub> και H<sub>2</sub> στην άνοδο.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών κυψελών καυσίμου παρατίθενται στον Πίνακα 12. Καθένας από τους επτά τύπους κυψελών καυσίμου παρουσιάζει ξεχωριστά χαρακτηριστικά απόδοσης σχετικά με τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά ζητήματα, μαζί με την καταλληλότητα τους για θαλάσσια χρήση. Ωστόσο, η επιλογή της πιο υποσχόμενης επιλογής δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε μεμονωμένους δείκτες.

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, οι PEMFC/HT-PEMFC, MCFC και SOFC θεωρούνται οι πιο υποσχόμενες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου για ναυτιλιακές εφαρμογές (Inal, et al., 2020).

Πίνακας 12: Τυπικά υλικά ηλεκτροδίων και ηλεκτρολυτών σε κυψέλες καυσίμου και οι αντίστοιχες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις (Tronstad, et al., 2017)

Τύπος	Άνοδος	Κάθοδος	Ηλεκτρολύτης	Καύσιμο	Ηλεκτροχημική Αντίδραση Ανόδου	Ηλεκτροχημική Αντίδραση Καθόδου
AFC	νικέλιο	άργυρος	υδροξείδιο του καλίου	H <sub>2</sub>	2H <sub>2</sub> + 4OH <sup>-</sup> → 4H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup> → 4OH <sup>-</sup>
PEMFC	πλατίνα	πλατίνα	μεμβράνη πολυμερούς με βάση το νερό	H <sub>2</sub>	2H <sub>2</sub> → 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O
HT-PEMFC	πλατίνα	πλατίνα	μεμβράνη με βάση άλατα οξέων	H <sub>2</sub>	2H <sub>2</sub> → 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O
PAFC	πλατίνα- άνθρακας	πλατίνα- άνθρακας	φωσφορικό οξύ	H <sub>2</sub> , LNG και μεθανόλη	2H <sub>2</sub> → 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O
DMFC	πλατίνα- ρουθίνιο	πλατίνα- ρουθίνιο	μεμβράνη πολυμερούς με βάση το νερό	Μεθανόλη	2CH <sub>3</sub> OH + 2H <sub>2</sub> O → 12H <sup>+</sup> + 12e <sup>-</sup>	3O <sub>2</sub> + 12H <sup>+</sup> + 12e <sup>-</sup> → 6H <sub>2</sub> O
MCFC	κράμα νικελίου	οξείδιο του νικελίου-λιθίου	λιωμένο ανθρακικό αλάτι	H <sub>2</sub> , μεθανόλη υδρογονάνθρακες	2H <sub>2</sub> + 2CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> → 2H <sub>2</sub> O + 2CO <sub>2</sub> + 4e <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> + 2CO <sub>2</sub> + 4e <sup>-</sup> → 2CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
SOFC	κράμα νικελίου	λανθάνιο στρόντιο μαγγάνιο	πορώδες κεραμικό υλικό	H <sub>2</sub> , μεθανόλη και υδρογονάνθρακες	2H <sub>2</sub> + 2O <sub>2</sub> <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> + 4e <sup>-</sup> → 2O <sup>2-</sup>



Πίνακας 13: Βασικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου (Tronstad, et al., 2017) (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2020)

Τύποι	Θερμοκρασία Λειτουργίας, °C	Χωρητικότητα Ισχύος	Αποδοτικότητα (Ηλεκτρική)	Αποδοτικότητα (Συνολική)	Μειονεκτήματα	Ανάκτηση Θερμικής Ενέργειας	Σχετικό Κόστος	Διάρκεια Ζωής	Μέγεθος
AFC	60–200	<500 kW	50–60%	-	Δηλητηρίαση από CO <sub>2</sub>	-	Χαμηλό	Μέτριο	Μικρό
PEMFC	65–85	<120 kW	50–60%	-	Δηλητηρίαση από CO + S	-	Χαμηλό	Μέτριο	Μικρό
HT-PEMFC	160–220	-	50–60%	80%	Δηλητηρίαση από CO + S	Εναλλάκτης Θερμότητας/ Ατμοτούρμπινα	Μέτριο	Μέτριο	Μικρό
PAFC	140–200	100–400 kW	40–55%	80%	Δηλητηρίαση από CO + S	Εναλλάκτης Θερμότητας/ Ατμοτούρμπινα	Μέτριο	Καλό	Μεγάλο
DMFC	75–120	<5 kW	20–30%	-	Διαρροή μεθανόλης	-	Μέτριο	Μέτριο	Μικρό
MCFC	650–700	120 kW–10 MW	50–55%	85%	Δηλητηρίαση από S, μακράς διάρκειας εκκίνηση	Εναλλάκτης Θερμότητας/ Αεριοτούρμπινα/ Ατμοτούρμπινα	Υψηλό	Καλό	Μεγάλο

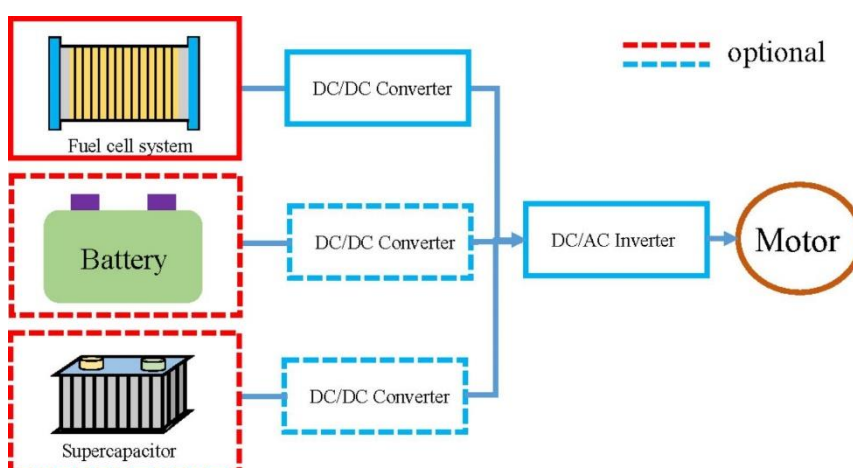
Τύποι	Θερμοκρασία Λειτουργίας, °C	Χωρητικότητα Ισχύος	Αποδοτικότητα (Ηλεκτρική)	Αποδοτικότητα (Συνολική)	Μειονεκτήματα	Ανάκτηση Θερμικής Ενέργειας	Σχετικό Κόστος	Διάρκεια Ζωής	Μέγεθος
SOFC	500–1000	<10 MW	50–60%	85%	Δηλητηρίαση από S, μηχανικά εύθραυστο, μακράς διάρκειας εκκίνηση	Εναλλάκτης Θερμότητας/ Αεριοτουρμπίνα/ Ατμοτουρμπίνα	Υψηλό	Μέτριο	Μέσο

#### 4.4.1 Συστήματα πρόωσης κυψελών καυσίμου στα πλοία

##### 4.4.1.1 Υβριδικά συστήματα ισχύος που συνδυάζουν κυψέλες καυσίμου και αποθήκευση ενέργειας

Στον τομέα των εφαρμογών οχημάτων κυψελών καυσίμου, τα υβριδικά συστήματα που περιλαμβάνουν κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες (ή υπερπυκνωτές) έχουν αποκτήσει ευρεία χρήση, με τις στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας τους να έχουν ερευνηθεί εκτενώς (IoanSorin, et al., 2021). Ένα τυπικό σχήμα ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος ισχύος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 47, περιλαμβάνει ένα υποσύστημα κυψελών καυσίμου, μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία ή υπερπυκνωτής), έναν μετατροπέα DC/DC, έναν μετατροπέα και έναν ηλεκτροκινητήρα. Αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου είτε χαμηλής είτε υψηλής θερμοκρασίας, κατάλληλες ως κύρια πηγή ενέργειας για μικρά πλοία ή ως βοηθητική ισχύ για ορισμένους τύπους πλοίων. Η συσκευή αποθήκευσης ενέργειας παίζει κρίσιμο ρόλο στην εξισορρόπηση των διακυμάνσεων του φορτίου, στην παροχή μέγιστης ισχύος και στην προσαρμογή συχνών αλλαγών φορτίου.

Οι πρακτικές εφαρμογές αυτών των συστημάτων είναι εμφανείς σε έργα όπως το RiverCell, το οποίο, από το 2022, χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει γεννήτριες ντίζελ, κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας και μπαταρίες (RiverCell2). Το πρόγραμμα SchiBZ2 (2017-2019) κατέδειξε περαιτέρω τη σκοπιμότητα χρήσης ενός υβριδικού συστήματος κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) και μπαταριών ιόντων λιθίου σε ένα γενικό φορτηγό πλοίο (Tronstad, et al., 2017). Πιο συγκεκριμένα, τροφοδοτείται από καύσιμο ντίζελ, περιλαμβάνοντας μια μονάδα αναμόρφωσης καυσίμου επί του σκάφους.



Εικόνα 48: Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου-συσκευής αποθήκευσης ενέργειας (Bassam, et al., 2016)

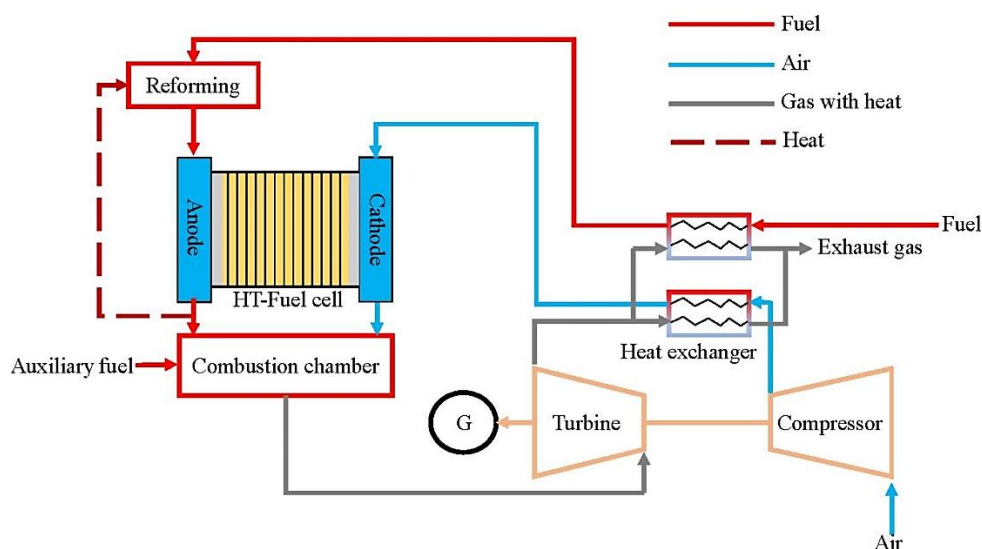
Αρκετές μελέτες υποδεικνύουν ότι με τη σωστή διαχείριση ενέργειας, η γρήγορη απόκριση των μπαταριών μπορεί να αντισταθμίσει την πιο αργή απόκριση των κυψελών καυσίμου, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος. Τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή αυτών των υβριδικών συστημάτων έχει παραμείνει σε μεγάλο βαθμό σταθερή, βρίσκοντας εφαρμογή σε πολλά θαλάσσια σκάφη. Ο πρωταρχικός στόχος της στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας στα υβριδικά συστήματα ισχύος αποθήκευσης κυψελών καυσίμου-ενέργειας είναι η αποτελεσματική κάλυψη των απαιτήσεων ισχύος του πλοίου. Η συσκευή αποθήκευσης ενέργειας παρέχει άμεση ισχύ, επιτρέποντας στην κυψέλη καυσίμου να προσαρμοστεί σταδιακά στο απαιτούμενο επίπεδο ισχύος, γεγονός που όχι μόνο μειώνει την κατανάλωση καυσίμου αλλά και παρατείνει τη διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου.

#### 4.4.1.2 Υβριδικά Συστήματα Κυψελών Καυσίμου-Στροβίλου

Οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι κυψέλες καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC) και οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), είναι γνωστές για την παραγωγή σημαντικής θερμότητας κατά τη λειτουργία. Η χρήση αυτής της θερμότητας σε συστήματα αεριοστροβίλων-FC βελτιώνει σημαντικά τη συνολική απόδοση (Mehrooza, et al., 2016). Η πρόσφατη έρευνα έχει επικεντρωθεί στο συνδυασμό αεριοστροβίλων με αυτές τις κυψέλες καυσίμου για τη δημιουργία εξαιρετικά αποδοτικών συστημάτων ισχύος για την πρόωση πλοίων και την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών τους (Xing, et al., 2021). Η ευελιξία αυτών των κυψελών καυσίμου στην επιλογή καυσίμου αυξάνει περαιτέρω την προσαρμοστικότητα του συστήματος (Rupiper, et al., 2022).

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 48, ένα τυπικό σύστημα αεριοστροβίλου-FC, που βασίζεται στον κύκλο Brayton, περιλαμβάνει κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, έναν αεριοστρόβιλο, εναλλάκτες θερμότητας και βοηθητικές συσκευές. Για τις εφαρμογές σε πλοία, αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν συνήθως καύσιμα υδρογονανθράκων όπως φυσικό αέριο αντί για καθαρό υδρογόνο, λόγω κόστους, αποθήκευσης και μεταφοράς. Αυτό απαιτεί την αναμόρφωση των υδρογονανθράκων για την παραγωγή ενός μείγματος αερίου πλούσιου σε υδρογόνο για τις κυψέλες καυσίμου (Baldi, et al., 2020) (Nahar, et al., 2017). Η εσωτερική αναμόρφωση προτιμάται συχνά από την εξωτερική, καθώς εξαλείφει την ανάγκη για χωριστά συστήματα αναμόρφωσης (Buonomano, et al., 2015). Το σύστημα λειτουργεί με τη συμπίεση του αέρα, ο οποίος στη συνέχεια προθερμαίνεται και παρέχεται στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου. Το καύσιμο, αφού προθερμανθεί και αναμορφωθεί, υφίσταται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στην άνοδο. Τα καύσιμα και τα καυσαέρια που δεν

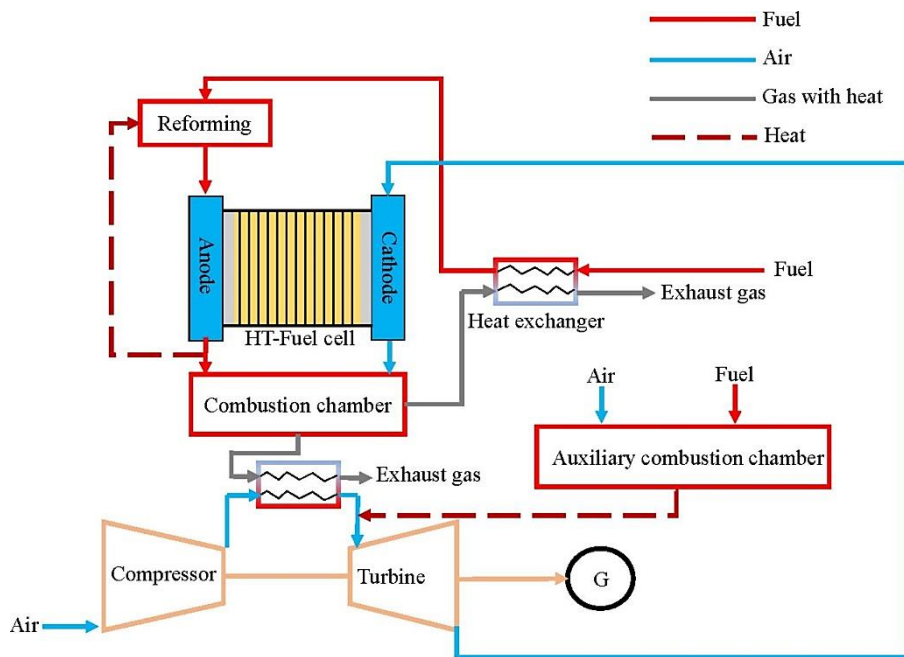
αντέδρασαν καίγονται για να παράγουν θερμότητα, η οποία υποστηρίζει την αναμόρφωση του καυσίμου και οδηγεί τον στρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 49: Σχηματικό διάγραμμα αεριοστρόβιλου-FC (άμεση σύνδεση) ( Βουνοπαπο, και συν., 2015)

Το σύστημα αεριοστρόβιλου FC μπορεί να διαμορφωθεί ως άμεσο ή έμμεσο σύστημα. Σε ένα άμεσο σύστημα, ο στρόβιλος κινείται από τα καυσαέρια από την κυψέλη καυσίμου. Αυτή η διαμόρφωση είναι πιο ελκυστική για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών εισόδου του στρόβιλου και της μειωμένης ανάγκης για βοηθητικά εξαρτήματα (Xing, et al., 2021). Αντίθετα, το έμμεσο σύστημα χρησιμοποιεί έναν βοηθητικό θάλαμο καύσης για τη θέρμανση του αέρα που οδηγεί τον στρόβιλο, επιτρέποντας την ανεξάρτητη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και του αεριοστρόβιλου, γεγονός που ενισχύει την ασφάλεια και την αξιοπιστία. Ωστόσο, απαιτεί έναν επιπλέον εναλλάκτη θερμότητας στην είσοδο του στρόβιλου.

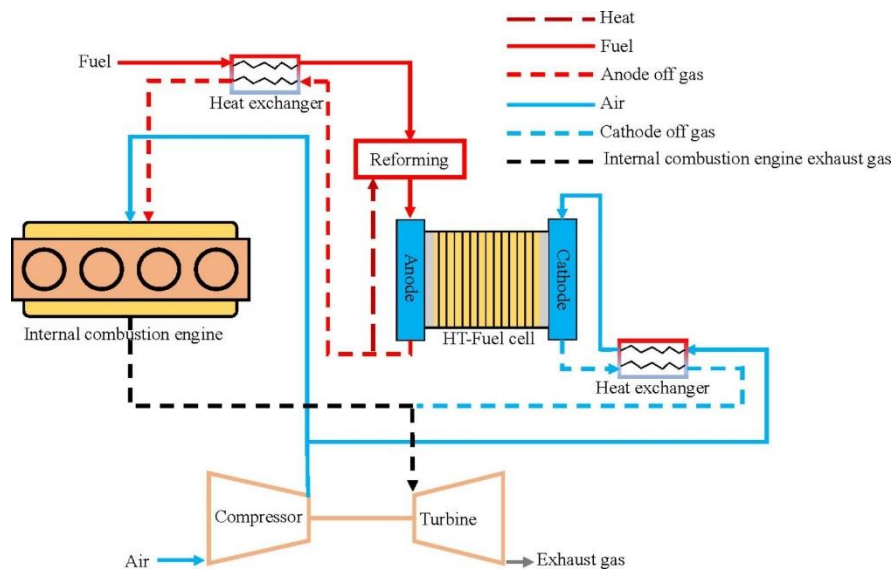
Το άμεσο σύστημα προσφέρει πιο ευέλικτες διατάξεις και αποτελεσματική χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας, χωρίς την ανάγκη εναλλάκτη θερμότητας στην είσοδο του στρόβιλου. Ωστόσο, οι μηχανικοί περιορισμοί του περιορίζουν το εύρος λειτουργίας σε σύγκριση με το έμμεσο σύστημα, το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας έναν εναλλάκτη θερμότητας. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αρχιτεκτονικές του συστήματος (όπως φαίνεται στην Εικόνα 48 και στην Εικόνα 49) μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιείται, επηρεαζόμενες από παράγοντες όπως διαφορετικές θερμοκρασίες καυσαερίων καθόδου.



Εικόνα 50: Σχηματικό διάγραμμα αεριοστρόβιλου-FC (έμμεση σύνδεση) (Βυνοποτανο, και συν., 2015)

#### 4.4.1.3 Υβριδικά Συστήματα Ισχύος Κυψέλων Καυσίμου-Μηχανής Εσωτερικής Καύσης

Παρά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE) φημίζονται για την υψηλή αξιοπιστία, την ανθεκτικότητά τους και την ικανότητά τους για ταχεία απόκριση φορτίου. Τα υβριδικά συστήματα ισχύος που συνδυάζουν κινητήρες εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν μια ελκυστική λύση μιας και οι συμβατικές και νέες μπαταρίες περιορίζονται από ζητήματα υλικού, κόστους και ανθεκτικότητας. Τέτοια συστήματα προσφέρουν ευελιξία στις επιλογές καυσίμων και γρήγορη απόκριση, καθιστώντας τα δυνητικά αποτελεσματικά στη μείωση των εκπομπών. Τυπικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 51, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης σε αυτά τα συστήματα είναι τοποθετημένος κατάντη της κυψέλης καυσίμου. Μια συχνή διαμόρφωση περιλαμβάνει μια κυψέλη καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας σε συνδυασμό με έναν αεριοστρόβιλο (GT) για τη βελτίωση της θερμικής και συνολικής απόδοσης καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας χρησιμεύει ως ο κύριος πάροχος ισχύος, με τα αέρια ανόδου και καθόδου να περιέχουν σημαντική θερμότητα.



Εικόνα 51: Σχηματικό διάγραμμα μηχανής ICE-FC ( Buonomano, και συν., 2015)

Τα αέρια της ανόδου εκτός του ότι προθερμαίνουν το εισερχόμενο καύσιμο υποστηρίζουν και την αναμόρφωση του καυσίμου ενώ στη συνέχεια οδηγούνται στον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ταυτόχρονα, το αέριο της καθόδου, μετά την προθέρμανση του αέρα που εισέρχεται στην κάθοδο, συνδυάζεται με τα καυσαέρια από τον ICE για να οδηγηθούν στον αεριοστρόβιλο, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτεί αέρα στην κάθοδο των κυψελών καυσίμου και στον ICE. Η συμβατότητα του αεριοστρόβιλου με το σύστημα και η ακρίβεια των παραμέτρων σχεδιασμού του είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη λειτουργία και απόδοση. Η περιεκτικότητα σε υπολειμματικό καύσιμο στην άνοδο επηρεάζει επίσης την απόδοση του συστήματος. Στην περίπτωση που το περιεχόμενο είναι πολύ χαμηλό, μπορεί να μην επιτευχθεί αποτελεσματική καύση στον ICE.

Η αναγκαιότητα συμπερίληψης αεριοστρόβιλου σε τέτοια υβριδικά συστήματα αποτελεί αντικείμενο συζήτησης. Η ενσωμάτωση ενός αεριοστρόβιλου αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και τις προκλήσεις ελέγχου, ενώ η παράλειψή του απλοποιεί το σύστημα με τον ICE να μπορεί να επιλεγεί πιο ευέλικτα. Αυτή η θεώρηση υποδηλώνει ότι τα συστήματα κυψελών καυσίμου-ICE μπορεί να είναι πιο κατάλληλα για μικρού και μεσαίου μεγέθους πλοία, με τους αεριοστρόβιλους να προτιμούνται για μεγαλύτερα πλοία.

#### 4.4.2 Κρίσιμες Τεχνολογίες για πλοία που κινούνται με κυψέλες καυσίμου

- Βελτίωση της δυναμικής απόκρισης: Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ισχύος σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας, αλλά δυσκολεύονται να

ανταποκριθούν σε δυναμική απόκριση στις παροδικές ανάγκες ισχύος (Vogler, et al., 2010). Αυτή η αδυναμία ταχείας προσαρμογής στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις φορτίου οδηγεί σε πίεση στη μεμβράνη κυψέλης καυσίμου, μειώνοντας στη συνέχεια τη διάρκεια ζωής της (Kickulies, 2005). Η αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος δυναμικής απόκρισης είναι κρίσιμη κατά την ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου σε πλοία. Έρευνα των Su et al. μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου ρύθμισης ενεργού και άεργου ισχύος των κυψελών καυσίμου έχει διερευνήσει τη δυναμική απόκριση των κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC). Ωστόσο, η έρευνα σε αυτόν τον τομέα, ειδικά όσον αφορά τα υπάρχοντα πλοία που κινούνται με κυψέλες καυσίμου, παραμένει περιορισμένη. (Su, et al., 2014).

- Διαμόρφωση βέλτιστων συστημάτων ισχύος κυψελών καυσίμου: Η καλύτερη επιλογή συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου για εφαρμογές σε πλοία είναι μια περίπλοκη απόφαση που περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες. Η επιλογή κυψελών καυσίμου και καυσίμων logistics προσφέρει ποικίλες δυνατότητες, καθεμία από τις οποίες επηρεάζει τα συνολικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Τα βασικά ζητήματα για αυτήν την επιλογή περιλαμβάνουν την ηλεκτρική απόδοση, την ισχύ και την ενεργειακή πυκνότητα, τα μεταβατικά φορτία, τον χρόνο εκκίνησης του συστήματος, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την οικονομική βιωσιμότητα. Οι Biert et al. παρείχαν μια ανασκόπηση των συστημάτων ισχύος που είναι ενσωματωμένα με διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου σε πλοία, υπογραμμίζοντας τη σημασία αυτών των παραγόντων για την τεκμηριωμένη επιλογή. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό και την ανάπτυξη του καταλληλότερου συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου (Biert, et al., 2016).

#### 4.4.3 Μελλοντικές προοπτικές και προκλήσεις για την τεχνολογία κυψελών καυσίμου

Η ενσωμάτωση των συστημάτων κυψελών καυσίμου (FCS) στις θαλάσσιες δραστηριότητες, ιδίως με τη χρήση υδρογόνου ως καυσίμου, αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο βήμα προς την επίτευξη των στόχων της ναυτιλίας για μηδενικές εκπομπές. Αυτή η υιοθέτηση βασίζεται σε διάφορους παράγοντες, όπως η χωρητικότητα ισχύος, το μέγεθος, η ασφάλεια, το κόστος, η ανθεκτικότητα και η αξιοπιστία.

Χωρητικότητα ισχύος και Υβριδικά Συστήματα: Η ισχύς των κυψελών καυσίμου, που κυμαίνεται από δεκάδες kW έως λίγα MW, περιορίζει επί του παρόντος τη χρήση τους κυρίως στις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων και στις εσωτερικές πλωτές οδούς. Για να



επεκταθεί η δυνατότητα εφαρμογής τους στη ναυτιλία βαθέων υδάτων, είναι απαραίτητος ένας συνδυασμός FCS με μπαταρίες ή κινητήρες εσωτερικής καύσης/τουρμπίνες αερίου (ICE/GT) σε υβριδικά συστήματα πρόωσης. Η βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος σε τέτοια υβριδικά συστήματα και η βελτίωση των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας είναι απαραίτητα για την αύξηση της απόδοσης.

Τυποποίηση μεγέθους και εμπορευματοποίηση: Η εμπορική επιτυχία των κυψελών καυσίμου στις ναυτιλιακές εφαρμογές εξαρτάται σημαντικά από την τυποποίηση μεγέθους. Έργα όπως το STASHH (μονάδα FC τυπικού μεγέθους για εφαρμογές βαρέως τύπου) στοχεύουν στην ανάπτυξη προτύπων ανοιχτού μεγέθους για μονάδες κυψελών καυσίμου, διευκολύνοντας την ενσωμάτωσή τους σε ναυτιλιακές εφαρμογές. Αυτή η πρωτοβουλία στοχεύει να καταστήσει τα συστήματα κυψελών καυσίμου ανταγωνιστική εναλλακτική λύση στα συμβατικά συστήματα ισχύος (Didier, et al., 2022).

Ασφάλεια και Κανονισμοί: Οι αξιολογήσεις ασφαλείας των συστημάτων ισχύος κυψελών καυσίμου πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο το FCS αλλά και το καύσιμο που είναι αποθηκευμένο στο σκάφος. Οι τρέχοντες κανονισμοί, όπως ο κώδικας IGF, αντιμετωπίζουν τη χρήση αερίων ή καυσίμων χαμηλού σημείου ανάφλεξης στα πλοία, αλλά η ενσωμάτωση του FCS απαιτεί περαιτέρω βελτίωση αυτών των κανόνων. Η συμπερίληψη συστημάτων κυψελών καυσίμου στους διεθνείς κανονισμούς για την ασφάλεια στη θάλασσα είναι επιτακτική για την ευρύτερη εφαρμογή τους.

Κόστος και Δυναμική Αγοράς: Τα υψηλά κεφαλαιακά και λειτουργικά κόστη περιόρισαν ιστορικά την ευρεία υιοθέτηση του FCS στη ναυτιλία. Οι οικονομίες κλίμακας, οι αναδυόμενες τεχνολογίες στη μεταρρύθμιση των καυσίμων και η χρήση οικονομικά αποδοτικών υλικών μπορούν να μειώσουν σημαντικά αυτά τα κόστη. Επιπλέον, η ανάπτυξη υποδομών για ανανεώσιμα καύσιμα, όπως το πράσινο υδρογόνο, είναι κρίσιμη για τη μελλοντική βιωσιμότητα των FCS (Chen, et al., 2019) (Perna, et al., 2018).

Ανθεκτικότητα και περιβαλλοντικά ζητήματα: Οι προκλήσεις ανθεκτικότητας, όπως η υποβάθμιση των ηλεκτρολυτών, των ηλεκτροδίων και των διπολικών πλακών, επηρεάζουν σημαντικά τη διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων μέσω νέων υλικών και τεχνολογιών και η λειτουργία του FC σε συνθήκες σταθερής κατάστασης όσο το δυνατόν περισσότερο, είναι ζωτικής σημασίας για τη μακροπρόθεσμη απόδοσή τους. Επιπλέον, το θαλάσσιο περιβάλλον, ιδιαίτερα η ομίχλη του θαλασσινού νερού, μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των κυψελών καυσίμου, απαιτώντας προστατευτικά μέτρα έναντι τέτοιων συνθηκών (Sasank, et al., 2016).

Αξιοπιστία και ανάπτυξη υποδομής: Η αξιόπιστη υποδομή καυσίμων και οι σταθμοί ανεφοδιασμού πράσινων καυσίμων είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη του FC σε ναυτιλιακές εφαρμογές. Τα νομοθετικά και πολιτικά πλαίσια σε διάφορα επίπεδα είναι απαραίτητα για την υποστήριξη αυτής της υποδομής. Επιπλέον, η ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου με μπαταρίες μπορεί να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις μεταβολής του φορτίου, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία των θαλάσσιων συστημάτων ισχύος.

Αυτή η προοπτική ευθυγραμμίζεται με το όραμα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) για ναυτιλία χωρίς άνθρακα και υπογραμμίζει την ανάγκη για στρατηγικό σχεδιασμό και τεχνολογικές εξελίξεις για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου στις θαλάσσιες εφαρμογές.

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις πλοίων που εφαρμόζουν τεχνολογίες κυψελών καυσίμου

Όνομα Πλοίου	Τύπος Πλοίου	Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Χαρακτηριστικά πλοίου	Σύστημα Ενέργειας	Παραγόμενη Ισχύς (kW)	Καύσιμο
FCS Alsterwasser	Επιβατηγό	PEMFC	25 m μήκος—100 passengers—max speed of 8 knots	2 x 48 kW PEMFC, 7 lead-gel battery packs 234 kWh, 100 kW propulsion electric motor and a 20-kW bow thruster	96 kW	Hydrogen
Nemo H2	Επιβατηγό	PEMFC	22 m μήκος—88 passengers—max speed of 8.6 knots	2 x 30 kW PEMFC, 55 lead-acid battery packs 70 kWh, a 75-kW propulsion electric motor and 11-kW bow thruster	60 kW	Hydrogen
SF-BREEZE	Επιβατηγό ferry	PEMFC	35 knots	41 x 120 kW PEMFC, each rack 4 x 30 kW PEMFC stacks.	120 kW	Hydrogen
Cobalt 233 Zet	Τουριστικό Πλοίο	PEMFC	20-m-μήκος, light weight of 20 tons—50 passengers	2 x 28 kW PEMFC, 3 x 15.7 kWh Li-ion battery packs	50 kW	Hydrogen
MS Mariella	Επιβατηγό Πλοίο	PEMFC	2500 Pax	2 x 30 kW PEMFC, each comprised of 6 x 5 kW modules.	60 kW	Methanol
MF Vågen	Μικρό Επιβατηγό Πλοίο	PEMFC	-	-	12 kW	Hydrogen

Όνομα Πλοίου	Τύπος Πλοίου	Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Χαρακτηριστικά πλοίου	Σύστημα Ενέργειας	Παραγόμενη Ισχύς (kW)	Καύσιμο
Viking Lady	Offshore supply vessel	MCFC	Length 92.2—breadth 21 m-draft 7.6 m-deadweight 5900 ton	320 kW MCFC as APU, internal reforming unit and WHR system	320 kW	LNG
MV Undine	Car carrier	SOFC	-	20 kW SOFC	20 kW	Methanol
MS Forester	General cargo ship	SOFC	-	50 kW SOFC with Li-ion battery packs developed for APU	50 kW	Low-sulphur diesel
Hornblower Hybrid	Επιβατηγό ferry	PEMFC	Length x Breadth: 20 x 10 m	Hybrid ferry with diesel generator, batteries, PV, wind and fuel cell	32 kW	Hydrogen + Diesel
Class 212A/214 Submarines	Submarines	PEMFC	-	Hybrid propulsion using a fuel cell and diesel ICE	306 kW	Hydrogen
ZEUS	Experimental research vessel	PEMFC	Length = 25.6 m	2 x 150 kW diesel generators and 2 electric propulsion motors-2 x 70 kW Fuel Cell plant and Battery	130 kW (FC) and 160 kWh (Battery)	Hydrogen
Ship Name	Ship Type	Fuel Cell Type	Specification	Power System	Power Output	Fuel
S80 class	Submarines	PEMFC	80.8m μήκος	300 kW FC stacks	-	Hydrogen

Όνομα Πλοίου	Τύπος Πλοίου	Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Χαρακτηριστικά πλοίου	Σύστημα Ενέργειας	Παραγόμενη Ισχύς (kW)	Καύσιμο
MF Hidle	Επιβατηγό and car ferry	PEMFC	199 passengers, 60 cars & 6 trucks—Daily operation: 260 km, 19 h	3 x 200 kW PEMFC modules—Battery capacity 500 kWh—Biodiesel generator back-up power	600 kW	Hydrogen
Topeka	Coastal goods-carrying RoRo	PEMFC	-	3 MW PEMFC + 1 MWh batteries	3 MW	Hydrogen
Hynova	Yacht	PEMFC	Autonomy 8 h	80 kW FC + 2 battery stacks + 2 electric motor of 300 kW	80 kW	Hydrogen
FPS Maas	Inland container vessel	PEMFC	Length x breadth = 110 x 11.45 m	825 kW PEMFC + 504 kWh lithium-ion battery pack	825 kW	Hydrogen
Ulstein SX190	Offshore construction vessel	PEMFC	Length x breadth x Draught = 99 x 23.4 x 6 m	2 MW PEMFC	2 MW	Hydrogen
Zero-V	Coastal research vessel	PEMFC	Trimaran Hull, Length x breadth x Draught = 52 x 17 x 3.7 m, Range: 2400 nm, Cruise Speed: 10 knots	10 x 180 kW PEMFC racks	1.8 MW	Hydrogen

Όνομα Πλοίου	Τύπος Πλοίου	Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Χαρακτηριστικά πλοίου	Σύστημα Ενέργειας	Παραγόμενη Ισχύς (kW)	Καύσιμο
Sea Change	Passenger ferry	PEMFC	Length x breadth = 22 x 7.5 m, 78 passengers, Max speed = 20 knots	3 x 120 kW PEMFC + 2 x 50 kW battery + 2 x 300 kW electric motor	360 kW	Hydrogen
FPS Maas	Inland container vessel	PEMFC	Length x breadth = 110 x 11.45 m	825 kW PEMFC + 504 kWh lithium-ion battery pack	825 kW	Hydrogen
Ulstein SX190	Offshore construction vessel	PEMFC	Length x breadth x Draught = 99 x 23.4 x 6 m	2 MW PEMFC	2 MW	Hydrogen
Zero-V	Coastal research vessel	PEMFC	Trimaran Hull, Length x breadth x Draught = 52 x 17 x 3.7 m, Range: 2400 nm, Cruise Speed: 10 knots	10 x 180 kW PEMFC racks	1.8 MW	Hydrogen
Sea Change	Passenger ferry	PEMFC	Length x breadth = 22 x 7.5 m, 78 passengers, Max speed = 20 knots	3 x 120 kW PEMFC + 2 x 50 kW battery + 2 x 300 kW electric motor	360 kW	Hydrogen

#### 4.4.4 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις έργων και πλοίων με τεχνολογίες κυψελών καυσίμου

##### **ShipFC**

Το έργο ShipFC, που χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα Horizon 2020 της ΕΕ και συντονίζεται από την NCE Maritime CleanTech, είναι μια πρωτοποριακή πρωτοβουλία στον ναυτιλιακό τομέα που επικεντρώνεται στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Ο πρωταρχικός στόχος του έργου είναι η εγκατάσταση κυψέλης αμμωνίας 2 MW στο υπεράκτιο πλοίο Viking Energy, που ανήκει στην Eidesvik και λειτουργεί βάσει σύμβασης με την Equinor. Αυτή η εγκατάσταση, που έχει προγραμματιστεί για τα τέλη του 2023, θα επιτρέψει στο σκάφος να λειτουργεί αποκλειστικά με καθαρά καύσιμα για έως και 3.000 ώρες ετησίως (Ship FC, 2022). Η σημασία του έργου ShipFC έγκειται στην επίδειξη ταξιδιών μεγάλης εμβέλειας, μηδενικών εκπομπών με υψηλή ισχύ σε μεγαλύτερα πλοία, μια αξιοσημείωτη πρόοδος στη θαλάσσια βιωσιμότητα. Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιείται είναι μια κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), η οποία λειτουργεί με αμμωνία. Αυτή η επιλογή καυσίμου είναι στρατηγική, καθώς η αμμωνία μπορεί να παραχθεί βιώσιμα μέσω ηλεκτρόλυσης και έχει δυνατότητες ως μελλοντική πηγή ενέργειας για τη ναυτιλία λόγω της άφθονης διαθεσιμότητάς της και της ικανότητάς της να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον, το έργο σκοπεύει να αυξηθεί από μια κυψέλη καυσίμου 100 kW σε επίπεδο 2 MW. Αυτή η αναβάθμιση είναι ένα κρίσιμο μέρος του έργου, αντιπροσωπεύοντας μια σημαντική τεχνολογική πρόοδο στις εφαρμογές κυψελών καυσίμου για θαλάσσια χρήση. Το έργο περιλαμβάνει επίσης μελέτες σε τρεις πρόσθετους τύπους πλοίων για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας μεταφοράς αυτής της τεχνολογίας σε άλλους τομείς της ναυτιλιακής βιομηχανίας, συμπεριλαμβανομένων των φορτηγών πλοίων με λειτουργικά προφίλ που φτάνουν τα 20 MW (maritime cleantech, 2022).

Αξιολογώντας το Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL) του έργου ShipFC, φαίνεται ότι βρίσκεται στο TRL 6-7. Αυτή η αξιολόγηση βασίζεται στην τρέχουσα φάση του έργου, η οποία περιλαμβάνει την επίδειξη της τεχνολογίας σε σχετικό περιβάλλον (εγκατάσταση στο Viking Energy) και την προετοιμασία της για τη φάση λειτουργίας. Η εστίαση του έργου στην κλιμάκωση της τεχνολογίας και στην αξιολόγηση της σκοπιμότητάς της για ευρύτερη εφαρμογή στον ναυτιλιακό τομέα υποστηρίζει περαιτέρω αυτήν την εκτίμηση TRL.

## **Maranda**

Το έργο Maranda, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την ΕΕ στο πλαίσιο της κοινής επιχείρησης κυψελών καυσίμου και υδρογόνου, συντονίστηκε από το Τεχνικό Ερευνητικό Κέντρο VTT της Φινλανδίας. Πρωταρχικός στόχος του ήταν η ανάπτυξη και η δοκιμή ενός θαλάσσιου σταθμού ηλεκτροπαραγωγής βασισμένου σε σύστημα κυψελών καυσίμου υδρογόνου (FCS). Αυτό το έργο ανέπτυξε με επιτυχία ένα υβριδικό σύστημα που τροφοδοτείται από PEMFC (κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων) με καύσιμο υδρογόνο, ειδικά σχεδιασμένο για θαλάσσιες εφαρμογές. Το σύστημα δοκιμάστηκε στο ερευνητικό σκάφος Aranda (MARANDA, 2022).

Η μονάδα κυψελών καυσίμου περιελάμβανε δύο μονάδες, καθεμία ικανή να παράγει 82,5 kW, βασισμένη σε εμπορικές στοιβές PowerCell S3. Αυτές οι μονάδες τροφοδοτούνταν με συμπιεσμένο υδρογόνο στα 350 bar. Η συνολική απόδοση ήταν αρκετά ικανοποιητική για να καλυφθούν οι απαιτήσεις ισχύος για τον ηλεκτρικό εξοπλισμό του σκάφους και το σύστημα δυναμικής τοποθέτησης του. Ένα από τα σημαντικά επιτεύγματα του έργου ήταν η ανάπτυξη ενός κινητού δοχείου αποθήκευσης υδρογόνου, που αντιμετωπίζει την πρόκληση της υποδομής υδρογόνου. Αυτό το δοχείο θα μπορούσε να ανεφοδιαστεί με καύσιμα σε οποιονδήποτε σταθμό ανεφοδιασμού υδρογόνου 350 bar, ενισχύοντας την πρακτικότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας.

Η κοινοπραξία του έργου Maranda περιελάμβανε εταιρείες από ολόκληρη την αλυσίδα αξίας κυψελών καυσίμου, υποδεικνύοντας μια συνεργατική και ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ανάπτυξη και την εφαρμογή της τεχνολογίας. Το σύστημα δοκιμάστηκε αυστηρά σε συνθήκες παρόμοιες με τις θαλάσσιες συνθήκες της Αρκτικής πριν από την εφαρμογή του στο σκάφος-στόχος. Επιπλέον, το έργο διεξήγαγε μακροχρόνιες δοκιμές ανθεκτικότητας του συστήματος, συγκεντρώνοντας 4380 ώρες λειτουργίας σε διάστημα έξι μηνών σε μια βιομηχανική τοποθεσία (CORDIS, 2022).

Δεδομένης της ολοκληρωμένης δοκιμής, της ανάπτυξης μιας πρακτικής λύσης αποθήκευσης υδρογόνου και της επιτυχούς εφαρμογής σε ένα ερευνητικό σκάφος, το έργο Maranda μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει φτάσει σε υψηλό επίπεδο ετοιμότητας τεχνολογίας, πιθανότατα μεταξύ 6 και 7 TRL. Αυτή η αξιολόγηση δείχνει ότι η τεχνολογία έχει δοκιμαστεί και επικυρωθεί σε σχετικό περιβάλλον, ξεπερνώντας τη φάση του πρωτοτύπου και επιδεικνύοντας σημαντική αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα για θαλάσσιες εφαρμογές.



## **Nautilus**

Το έργο Nautilus, επίσημα γνωστό ως «Ναυτικό Ολοκληρωμένο Υβριδικό Ενεργειακό Σύστημα για Κρουαζιερόπλοια μεγάλων αποστάσεων» (Nautical Integrated Hybrid Energy System for Long-haul Cruise Ships), είναι μια αξιοσημείωτη πρωτοβουλία που χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του προγράμματος «Horizon 2020» της ΕΕ. Συντονίζεται από το Γερμανικό Αεροδιαστημικό Κέντρο (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.), και περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ εννέα βιομηχανικών εταιρών και έξι ερευνητικών οργανισμών από διάφορες χώρες της ΕΕ. Το έργο, το οποίο ξεκίνησε τον Ιούλιο του 2020 και πρόκειται να ολοκληρωθεί τον Δεκέμβριο του 2024, εστιάζει στην ανάπτυξη ενός ενεργειακού συστήματος χαμηλών εκπομπών ειδικά σχεδιασμένο για μεγάλα επιβατηγά κρουαζιερόπλοια (CORDIS, 2020).

Ο πρωταρχικός στόχος του έργου Nautilus είναι η ανάπτυξη και η επικύρωση ενός υβριδικού συστήματος ισχύος. Αυτό το σύστημα βασίζεται σε μια κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) που τροφοδοτείται από Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG), ένα σύστημα μπαταρίας και την υπάρχουσα μηχανή εσωτερικής καύσης ενός κρουαζιερόπλοιου. Το ζητούμενο αποτέλεσμα είναι να ικανοποιηθούν οι ηλεκτρολογικές απαιτήσεις των κρουαζιερόπλοιων που χρησιμοποιούν αυτή την καθαρή τεχνολογία. Συγκεκριμένα, το έργο σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει ένα υβριδικό σύστημα SOFC-μπαταριών για την επίτευξη αυτού του στόχου. Το έργο χρησιμοποιεί μια εικονικής πραγματικότητας μοντελοποίηση για την επικύρωση της διαδικασίας σχεδιασμού αυτού του ενεργειακού συστήματος υπό θαλάσσιες συνθήκες. Αυτή η προσέγγιση προορίζεται να καλύψει δύο κατηγορίες κρουαζιερόπλοιων, που φιλοξενούν 1000 και 5000+ επιβάτες, με ενεργειακές απαιτήσεις που κυμαίνονται μεταξύ 5 και 60 MW. Επιπλέον, το Nautilus εργάζεται σε εργαστηριακή κλίμακα λειτουργικής επίδειξης γεννήτριας (60 kW SOFC + μπαταρία) για την επικύρωση του σχεδιασμού του ενεργειακού συστήματος σε συμμόρφωση με τους κανόνες θαλάσσιας ασφάλειας (Nautilus, 2020).

Το έργο Nautilus αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προς τη μείωση των εκπομπών στον ναυτιλιακό τομέα, ευθυγραμμιζόμενο με τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού και τους κανονισμούς του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Το υβριδικό σύστημα που ενσωματώνει την τεχνολογία SOFC-μπαταρίας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλότερη απόδοση, βελτιωμένη δυναμική ικανότητα, ευελιξία καυσίμου και χαμηλότερη συντήρηση λόγω λιγότερων κινούμενων εξαρτημάτων.

Το έργο Nautilus, με στόχο την ανάπτυξη και την επικύρωση ενός υβριδικού συστήματος ισχύος για κρουαζιερόπλοια, βρίσκεται επί του παρόντος σε σχετικά προχωρημένο στάδιο στον κύκλο ανάπτυξής του, ενδεικτικό υψηλού επιπέδου ετοιμότητας τεχνολογίας (TRL).

Δεδομένης της προόδου του έργου, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης μιας εικονικής συσκευής επίδειξης για την επικύρωση του σχεδιασμού του ενεργειακού συστήματος και τη δοκιμή της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) σε συγκεκριμένες συνθήκες, φαίνεται να βρίσκεται στο TRL 5 ή 6. Αυτή η αξιολόγηση βασίζεται στην τρέχουσα φάση του έργου, η οποία περιλαμβάνει τη δοκιμή της τεχνολογίας σε σχετικό περιβάλλον (εργαστηριακή κλίμακα ) αλλά όχι ακόμη σε λειτουργικό περιβάλλον.

Το συγκεκριμένο TRL μπορεί να διαφέρει για διαφορετικά στοιχεία ή πτυχές του έργου. Για παράδειγμα, ορισμένα στοιχεία μπορεί να είναι πιο κοντά στην ενοποίηση του συστήματος (TRL 6), ενώ άλλα, ειδικά εκείνα που βρίσκονται στην εννοιολογική ή πρώιμη φάση δοκιμών, μπορεί να βρίσκονται σε ελαφρώς χαμηλότερο TRL. Το τελικό TRL μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια μόνο μετά την ολοκλήρωση όλων των φάσεων δοκιμής και επικύρωσης, συμπεριλαμβανομένων των επιδείξεων σε λειτουργικά περιβάλλοντα.

### **HyShip**

Το έργο HyShip, που υποστηρίζεται από το πρόγραμμα EU Horizon 2020 και τον νορβηγικό κρατικό οργανισμό Epona, είναι μια συλλογική προσπάθεια που περιλαμβάνει 14 Ευρωπαίους εταίρους. Στόχος του έργου είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός καινοτόμου πλοίου τύπου Ro-Ro με το όνομα "Torreka", που θα τροφοδοτείται από πράσινο υγρό υδρογόνο. Αυτό το σκάφος θα ενσωματώσει μια κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων 3 MW (PEMFC) με σύστημα μπαταρίας 1 MWh. Το πράσινο καύσιμο υδρογόνου για το Torreka θα προέρχεται από το εργοστάσιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο Mongstad της Νορβηγίας (HyShip Project, 2022).

Ο πρωταρχικός ρόλος της Torreka θα είναι η μεταφορά φορτίων και η διανομή υγρού υδρογόνου σε σταθμούς ανεφοδιασμού καυσίμων κατά μήκος της νορβηγικής ακτής. Εκτός από την κατασκευή του Torreka, το έργο HyShip περιλαμβάνει επίσης μελέτες για άλλους τύπους πλοίων, όπως φορτηγίδα μεταφοράς χύδην φορτίου, ferry και δεξαμενόπλοιο, με αντίστοιχα επιχειρησιακά προφίλ ισχύος 20 MW, 3 MW και 1 MW.

Το έργο στοχεύει στη μείωση του κόστους ανάπτυξης και λειτουργίας της μετάβασης σε υγρό υδρογόνο (LH<sub>2</sub>) για την πρόωση πλοίων σε όλη την Ευρώπη. Επιδιώκει επίσης να δημιουργήσει μια ολοκληρωμένη υποδομή LH<sub>2</sub> και ένα εμπορικό δίκτυο, με στόχο τη μείωση της ετήσιας οδικής κυκλοφορίας με την απομάκρυνση περίπου 25.000 φορτηγών. Το Torreka, που είναι το πρώτο σκάφος του είδους του, όχι μόνο θα μεταφέρει φορτίο αλλά και θα παραδίδει το LH<sub>2</sub> σε κόμβους ανεφοδιασμού, συμβάλλοντας σημαντικά στην ανάπτυξη ενός συστήματος θαλάσσιων μεταφορών μηδενικών εκπομπών.

Όσον αφορά το Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL) του έργου HyShip, μπορεί να συναχθεί ότι είναι στο TRL 5 ή 6. Αυτή η αξιολόγηση βασίζεται στην εστίαση του έργου στην ενσωμάτωση και επικύρωση ενός νέου ενεργειακού συστήματος σε ένα σχετικό περιβάλλον, όπως η ανάπτυξη και κατασκευή του πλοίου Toreka και η δημιουργία αλυσίδας εφοδιασμού LH<sub>2</sub>. Η πραγματική επιχειρησιακή ανάπτυξη του σκάφους, που έχει προγραμματιστεί για το 2024, θα σηματοδοτήσει μια περαιτέρω πρόοδο στο TRL.

### **TecBIA**

Το έργο TecBIA, που χρηματοδοτείται από το Ιταλικό Υπουργείο Οικονομικής Ανάπτυξης και συντονίζεται από την Fincantieri-Isotta Fraschini Motori S.p.A., επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών για την παραγωγή ενέργειας στα πλοία. Ένα βασικό επίτευγμα αυτού του έργου ήταν η ανάπτυξη και η δοκιμή του Ultimate Ship Zero-Emission (ZEUS), το οποίο τροφοδοτείται από κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και μπαταρίες.

Το σύστημα πρόωσης της ZEUS περιλαμβάνει δύο μονάδες ProtonMotor PEMFC ισχύος 71 kW που τροφοδοτούνται από υδρογόνο, αποθηκευμένες σε 48 δεξαμενές υδριδίου μετάλλου με συνολική χωρητικότητα υδρογόνου περίπου 45 kg. Αυτό το σύστημα είναι υβριδικό με χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας 150 kWh, χωρισμένη σε δύο πακέτα μπαταριών Li-ion (Cavo, et al., 2021). Οι επιτυχημένες θαλάσσιες δοκιμές του ZEUS, που ολοκληρώθηκαν το καλοκαίρι του 2022, απέδειξαν την αυτονομία των 7 ωρών με ταχύτητα 6 κόμβων. Η εστίαση του έργου στην ενσωμάτωση PEMFC, συστοιχιών μπαταριών και υδρογόνου που αποθηκεύονται σε υδρίδια μετάλλων σηματοδοτεί μια σημαντική πρόοδο στα υβριδικά συστήματα θαλάσσιας πρόωσης. Το ZEUS κέρδισε επίσης την αναγνώριση ως το πρώτο ιταλικό πλοίο υδρογόνου με πρόωση κυψελών καυσίμου που έλαβε πιστοποιητικό έγκρισης από τη RINA (Registro Italiano Navale) (Cavo, et al., 2022).

Όσον αφορά το Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL), το έργο TecBIA, ιδιαίτερα το πρωτότυπο ZEUS, πιθανότατα έφτασε σε υψηλό TRL, πιθανώς μεταξύ TRL 7 και 8. Αυτό υποδεικνύεται από την επιτυχή υλοποίηση και δοκιμή του πρωτοτύπου σε πραγματικό περιβάλλον (δοκιμές ανοιχτής θάλασσας), που αποτελεί βασικό κριτήριο για τον προσδιορισμό της ωριμότητας τέτοιων τεχνολογιών.

### **HySeas III**

Το έργο HySeas III, που χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα EU Horizon 2020, είναι μια φιλόδοξη πρωτοβουλία που περιλαμβάνει μια κοινοπραξία εννέα ευρωπαϊών εταιριών σε

επτά χώρες. Το έργο βασίζεται στη δυναμική των προκατόχων του, HySeas I και II, που ξεκίνησε το 2013 και το 2015 αντίστοιχα, με την υποστήριξη της Scottish Enterprise και του Καναδικού Υπουργείου Μεταφορών.

Το HySeas III στοχεύει στη σημαντική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στις θαλάσσιες μεταφορές, ευθυγραμμίζοντας με το Green New Deal & Fit της ΕΕ για 55 στόχους. Το επίκεντρο αυτού του έργου είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μηδενικών εκπομπών σε ένα πλοίο RoPax, το οποίο λειτουργεί στη Σκωτία μεταξύ Kirkwall και Shapinsay στα νησιά Orkney. Αυτό το ferry, σχεδιασμένο να μεταφέρει 120 επιβάτες και 20 επιβατικά οχήματα ή δύο φορτηγά, είναι αξιοσημείωτο για τις διαστάσεις του (40 μέτρα μήκος και 4 μέτρα βάθος). Μια βασική τεχνολογική πρόοδος στο έργο HySeas III είναι η ενσωμάτωση μιας κυψέλης καυσίμου Ballard HD100 6 × 100 kW, που συμπληρώνεται από συστοιχίες μπαταριών ιόντων λιθίου συνολικής χωρητικότητας 768 kWh. Το πλοίο αναμένεται να τροφοδοτείται από 600 κιλά συμπιεσμένου υδρογόνου στα 350 bar, το οποίο θα παραχθεί μέσω ηλεκτρόλυσης που τροφοδοτείται από αιολική και παλιρροιακή ενέργεια που παράγεται στα ερευνητικά έργα BIG HIT και SURF 'N' TURF στα νησιά Eday και Shapinsay.

Το έργο HySeas III έχει επιτύχει σημαντικά ορόσημα, συμπεριλαμβανομένης της επιτυχημένης δοκιμής πλήρους μεγέθους και της επαλήθευσης αυτού του καινοτόμου συστήματος ισχύος. Το έργο διευθύνεται από τη Ferguson Marine και το Πανεπιστήμιο του St. Andrews και περιλαμβάνει άλλους αξιόλογους εταίρους, όπως η Kongsberg, η Ballard Power Systems Europe, ο προμηθευτής καυσίμου υδρογόνου McPhy, η γερμανική αεροδιαστημική υπηρεσία DLR και η ένωση βιομηχανίας πορθμείων Interferry.

Λαμβάνοντας υπόψη τις συγκεκριμένες προόδους και το στάδιο ανάπτυξης, το HySeas III πιθανότατα εμπίπτει μεταξύ των TRL 6 και 7. Αυτό υποδεικνύεται από την επιτυχή ενσωμάτωση και δοκιμή των στοιχείων του συστήματος σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον, αν και όχι ακόμη σε λειτουργικό θαλάσσιο περιβάλλον.

## **HIMET**

Το έργο HIMET (Hydrogen in an Integrated Maritime Energy Transition), που χρηματοδοτείται από το Υπουργείο Μεταφορών και Καινοτομίας του Ηνωμένου Βασιλείου, διευθύνεται από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC) Hydrogen στο Orkney. Το έργο στοχεύει στην απαλλαγή από τις εκπομπές CO<sub>2</sub> στις θαλάσσιες μεταφορές, εστιάζοντας ιδιαίτερα στις υπηρεσίες μεταφοράς με ferry και τις λειτουργίες του τερματικού σταθμού κρουαζιέρας στο Orkney.

Οι βασικοί στόχοι του έργου HIMET περιελάμβαναν την υλοποίηση μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου ως βοηθητικού συστήματος ισχύος στο οχηματαγωγό RoRo MV Sharinsay και τη δοκιμή ενός συμβατικού κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) που τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο. Το έργο διερεύνησε επίσης λύσεις κινητήρων υδρογόνου και μικροδικτύων για την τροφοδοσία τερματικών εγκαταστάσεων πορθμείων, με ένα υβριδικό σύστημα μεταξύ κινητήρα υδρογόνου και ηλιακού φωτοβολταϊκού που παρουσιάστηκε στην προβλήτα Hatston στο Orkney για την παροχή ενέργειας στις εγκαταστάσεις αναψυχής του πληρώματος στον τερματικό σταθμό.

Όσον αφορά το Επίπεδο Ετοιμότητας Τεχνολογίας (TRL), το έργο HIMET φαίνεται να βρίσκεται στο TRL 6, το οποίο περιλαμβάνει επίδειξη μοντέλου συστήματος/υποσυστήματος ή πρωτοτύπου σε σχετικό περιβάλλον. Αυτό υποδεικνύεται από την ανάπτυξη και τη δοκιμή συστημάτων αποθήκευσης και τροφοδοσίας υδρογόνου στο MV Sharinsay και την εφαρμογή υβριδικών ενεργειακών λύσεων στο Hatston Pier. Ωστόσο, λόγω των στενών χρονοδιαγραμμάτων του έργου και των παγκόσμιων ζητημάτων της αλυσίδας εφοδιασμού, δεν ολοκληρώθηκαν όλες οι προγραμματισμένες δραστηριότητες επίδειξης εντός του χρονικού πλαισίου του έργου, γεγονός που υποδηλώνει ότι ορισμένες πτυχές του έργου ενδέχεται να συνεχίσουν να προχωρούν προς υψηλότερα TRL.

Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά παραδείγματα έργων και πλοίων-Εκτίμηση τεχνολογικής ωριμότητας

Όνομα Έργου	Εκτελεστής	Τύπος Κυψέλης Καυσίμου	Περιγραφή	Αξιολόγηση TRL
ShipFC	NCE Maritime CleanTech	SOFC	Ανάπτυξη συστήματος κυψέλης καυσίμου αμμωνίας 2 MW για το υπεράκτιο σκάφος Viking Energy.	TRL 6-7
Nautilus	Γερμανικό Κέντρο Αεροναυπηγικής	SOFC	Ανάπτυξη ενεργειακού συστήματος χαμηλών εκπομπών για κρουαζιερόπλοια, ενσωματώνοντας ένα υβριδικό σύστημα SOFC-μπαταρίας με ICE.	TRL 5-6
HyShip	Wilhelmsen και άλλοι ευρωπαϊκοί συνεργάτες	PEMFC	Σχεδιασμός και κατασκευή πλοίου Ro-Ro (Toreka) που κινείται με πράσινο υδρογόνο και σύστημα μπαταριών 1 MWh, με στόχο τη διανομή LH <sub>2</sub> σε σταθμούς ανεφοδιασμού κατά μήκος των νορβηγικών ακτών.	TRL 5-6
TecBIA	Fincantieri-Isotta Fraschini Motori S.p.A	PEMFC	Ανάπτυξη και δοκιμή του ZEUS, ενός πλοίου που κινείται με PEMFC και μπαταρίες, με στόχο τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της οικολογικής συμβατότητας.	TRL 7-8

#### 4.5 Παρατηρήσεις – Σχολιασμός

Η κριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών ηλιακής πρόωσης, αιολικής πρόωσης και κυψελών καυσίμου αναδεικνύει ένα συγκριτικό πλαίσιο προκλήσεων, ευκαιριών και πιθανών επιπτώσεων στην προσπάθεια της ναυτιλιακής βιομηχανίας να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Παρακάτω ταξινομούνται ανά κατηγορία οι παρατηρήσεις που προκύπτουν από την ανάλυση αυτών των τεχνολογιών όπως παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους:

- Τεχνολογίες ηλιακής πρόωσης: Το ενδιαφέρον της ηλιακής πρόωσης έγκειται στην υπόσχεσή της για μια καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ωστόσο, η μηχανική σκοπιά παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις. Η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας είναι επί του παρόντος ανεπαρκής για να καλύψει τις υψηλές απαιτήσεις ενέργειας των μεγάλων πλοίων. Η συνολική επιφάνεια που απαιτείται για την εγκατάσταση των ηλιακών πάνελ, για την παραγωγή της απαραίτητης ενέργειας δεν είναι πρακτικά διαθέσιμη για τα περισσότερα εμπορικά πλοία. Επιπλέον, η διαλείπουσα φύση της ηλιακής ενέργειας, που εξαρτάται από τον καιρό και το φως της ημέρας, θέτει ένα σημαντικό ζήτημα αξιοπιστίας. Παρότι οι εξελίξεις στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσαν ενδεχομένως να αυξήσουν τη βιωσιμότητα της ηλιακής πρόωσης, η τρέχουσα εφαρμογή της περιορίζεται σε μικρότερα πλοία ή σε βοηθητική ισχύ. Η ναυτιλιακή βιομηχανία πρέπει να επενδύσει σε μεγάλο βαθμό στην έρευνα και την ανάπτυξη για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια και να καταστήσει την ηλιακή πρόωση πιο εφικτή επιλογή για τα μεγαλύτερα πλοία.
- Τεχνολογίες αιολικής πρόωσης: Οι τεχνολογίες αιολικής πρόωσης, όπως οι ρότορες Flettner, τα ανεμόπτερα έλξης και τα προηγμένα συστήματα πανιών, έχουν σημειώσει σημαντικές εξελίξεις. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν τη δυνατότητα για σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων και μειώσεις εκπομπών. Ωστόσο, η ένταξή τους στη σύγχρονη ναυτιλία χαρακτηρίζεται από την περιπλοκότητα κάθε εφαρμογής. Η αποτελεσματικότητα της υποβοηθούμενης πρόωσης από τον άνεμο είναι πολύ μεταβλητή, εξαρτάται από τις συνθήκες ανέμου, τον σχεδιασμό του πλοίου και τις επιχειρησιακές διαδρομές. Επιπλέον, η μετασκευή των υφιστάμενων πλοίων με συστήματα αιολικής πρόωσης μπορεί να είναι δύσκολη, απαιτώντας συχνά ουσιαστικές τροποποιήσεις στο σχεδιασμό και τις λειτουργίες του πλοίου. Οι περιορισμοί υποδομής και υλικοτεχνικής υποστήριξης, όπως η συμβατότητα των λιμενικών υποδομών και ο αντίκτυπος στη θαλάσσια κυκλοφορία, περιπλέκουν

περαιτέρω την ευρεία υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών. Μολονότι η αιολική πρόωση είναι πολλά υποσχόμενη, η επιτυχία της ως μεθόδου συνεισφέροντας στη μείωση των εκπομπών στον παγκόσμιο στόλο εξαρτάται από την υπέρβαση αυτών των πολύπλευρων μηχανικών και επιχειρησιακών προκλήσεων.

- Τεχνολογίες πρόωσης κυψελών καυσίμου: Η πρόωση με εφαρμογή των κυψελών καυσίμου, ιδιαίτερα κυψελών καυσίμου υδρογόνου, αντιπροσωπεύει μια τεχνολογία αιχμής για την επίτευξη θαλάσσιων μεταφορών μηδενικών εκπομπών. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης, με το νερό ως το μόνο υποπροϊόν, καθιστώντας αυτές μια φιλική προς το περιβάλλον λύση. Ωστόσο, η εφαρμογή της τεχνολογίας στον ναυτιλιακό τομέα είναι ακόμη σε εξέλιξη. Η ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας, ανθεκτικών και αποδοτικών συστημάτων κυψελών καυσίμου ικανών να τροφοδοτούν μεγάλα πλοία παραμένει μια σημαντική τεχνολογική πρόκληση. Η δημιουργία μιας παγκόσμιας υποδομής καυσίμου υδρογόνου, η αντιμετώπιση της ασφαλούς αποθήκευσης και χειρισμού του στα πλοία και η διασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας της πρόωσης με κυψέλες καυσίμου είναι σημαντικά εμπόδια που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Οι δυνατότητες των κυψελών καυσίμου υδρογόνου ως τεχνολογίας θαλάσσιας πρόωσης είναι τεράστιες, αλλά η πραγματοποίησή της απαιτεί συντονισμένη προσπάθεια στην τεχνολογική έρευνα, την ανάπτυξη υποδομών και τα ρυθμιστικά πλαίσια.

Κατά τη σύνθεση αυτών των παρατηρήσεων, είναι σαφές ότι η μετάβαση σε πιο οικολογικές τεχνολογίες πρόωσης στη ναυτιλία δεν είναι απλώς ένα τεχνολογικό ζήτημα, αλλά ένα σύνολο πολύπλοκων ζητημάτων, που περιλαμβάνει τη μηχανική σκοπιμότητα, την οικονομική βιωσιμότητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ηλιακή πρόωση, αν και είναι μια καινοτόμα λύση, αντιμετωπίζει ανυπέρβλητες ίσως προκλήσεις όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα και την αξιοπιστία για μεγάλης κλίμακας εφαρμογή. Οι τεχνολογίες αιολικής πρόωσης απαιτούν σημαντικές προόδους στην ενσωμάτωση με τα υπάρχοντα σχέδια πλοίων και την επιχειρησιακή επιμελητεία. Η πρόωση κυψελών καυσίμου, ιδιαίτερα τα συστήματα που βασίζονται στο υδρογόνο, έχουν τη δυνατότητα για ένα μέλλον μηδενικών εκπομπών, αλλά εξακολουθεί να βρίσκεται στα εκκολλητόμενα στάδια ανάπτυξης με σημαντικά τεχνικά εμπόδια και άλλα υποδομής που πρέπει να ξεπεραστούν.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Ψηφιοποίηση ναυτιλίας

#### 5.1 Τεχνολογικές βάσεις και λύσεις

Η ανάλυση της ψηφιοποίησης της ναυτιλίας είναι μία απαιτητική διαδικασία. Για το σκοπό αυτό γίνεται προσπάθεια να εμβαθύνουμε στις θεμελιώδεις τεχνολογικές πτυχές της. Η συνέργεια διαφορετικών και διασυνδεδεμένων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης (A.I.) και πλατφορμών blockchain, δημιουργεί ένα ευρύ σύνολο ψηφιακών λύσεων. Μεταξύ αυτών είναι οι ειδικοί ψηφιακοί βοηθοί που έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν τις ξεχωριστές ανάγκες των κλάδων της ναυτιλίας, καθώς και τις αποκεντρωμένες διαδικασίες παρακολούθησης φορτίου (Πίνακα 15).

Πίνακας 16: Ψηφιακές εφαρμογές στη ναυτιλία

Τομείς Ψηφιοποίησης	Ψηφιακές Τεχνολογίες-Λύσεις
Λειτουργίες Πλοίου-Αυτόνομες Λειτουργίες	IoT, analytics, AI, 5G Τεχνικές και ναυτιλιακές λειτουργίες Διάφορα επίπεδα Αυτονομίας για Λειτουργίες Πλοίων Πλοήγηση, Ελλιμενισμός, Αποφυγή Σύγκρουσης
Εμπορικές και Επιχειρησιακές Λειτουργίες Ναυτιλίας Διαχείριση Επιχειρησιακών Λειτουργιών	IoT, analytics, AI Βελτιστοποίηση περιουσιακών στοιχείων, σχεδιασμός στόλου, σχεδιασμός υπηρεσιών
Λειτουργίες Εμπορίου και εφοδιαστικής αλυσίδας Ψηφιακές Πλατφόρμες	IoT, analytics, blockchain Παρακολούθηση φορτίου, Εμπόριο «χωρίς χαρτιά», Εφοδιαστικές Αλυσίδες Συγχρονισμός

Τομείς Ψηφιοποίησης	Ψηφιακές Τεχνολογίες-Λύσεις
Πλατφόρμες Διαδικτύου Πλοίων & Πλατφόρμες Διαδικτύου Θαλάσσιων Υπηρεσιών	Analytics, AI Έξυπνη Κράτηση Φορτίου (Smart Cargo Booking) Κόμβοι ανοιχτών δεδομένων Κόμβος για ναυτιλιακές εταιρείες, ναυπηγεία, κατασκευαστές εξοπλισμού, εταιρείες πληροφορικής, καιρού, εταιρείες πληροφοριών και παρόχους ψηφιακών λύσεων.

Είναι υψίστης σημασίας να αναγνωρίσουμε ότι οι ψηφιακές τεχνολογίες και λύσεις που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι περίπλοκα συνυφασμένες με ανάλογες τεχνολογίες και λύσεις εφοδιαστικής αλυσίδας (Pfohl et al. 2015).

## 5.2 Διαδίκτυο πλοίων και θαλάσσιων υπηρεσιών

Στον τομέα της ναυτιλίας, το παράδειγμα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) έχει αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό. Οι αισθητήρες, οι ενεργοποιητές και οι επεξεργαστές ενσωματώνονται απρόσκοπτα στα τεχνικά συστήματα των πλοίων, περιλαμβάνοντας κρίσιμα στοιχεία όπως κινητήρες, συστήματα επικοινωνίας, συστήματα ανάλυσης δεδομένων και συστήματα φορτίου. Συνολικά, αυτό το περίπλοκο δίκτυο διασυνδεδεμένων συστημάτων αποτελεί αυτό που αποκαλούμε «Διαδίκτυο πλοίων και θαλάσσιων υπηρεσιών» ( Levander το 2017).

Οι πλατφόρμες ενσωματωμένου λογισμικού διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στο συνδυασμό και τη διαχείριση των ολοένα και πιο αυτοματοποιημένων λειτουργιών των πλοίων, εναρμονίζοντάς τες με τον πολύπλοκο ιστό των επιχειρηματικών διαδικασιών της ναυτιλίας. Αυτή η ολιστική προσέγγιση επεκτείνεται για να συμπεριλάβει διασυνδεδεμένα συστήματα ναυτιλιακών υπηρεσιών εφοδιαστικής αλυσίδας logistics (Lycett 2013 ) (Shmueli et al. 2011) (Thomas et al., 2014).

Οι αξιοσημείωτες εξελίξεις στον τομέα των συστημάτων επικοινωνίας 5G, η δορυφορική τεχνολογία προσαρμοσμένη στο 5G και η απρόσκοπτη σύγκλιση σταθερών και κινητών τμημάτων, σε συνδυασμό με την καινοτόμο αρχιτεκτονική 5G, αποτελούν τους θεμελιώδεις τεχνολογικούς πυλώνες που στηρίζουν το Διαδίκτυο πλοίων και θαλάσσιων υπηρεσιών.

### 5.3 Τεχνητή Νοημοσύνη: Αυτόνομα Πλοία και Έξυπνη Ναυτιλία

Η εφαρμογή της Τεχνητής Νοημοσύνης (Α.Ι.) στη ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να αναλυθεί μέσα από δύο βασικές και διακριτές αλλά αλληλένδετες λειτουργίες:

a) Τα αυτόνομα πλοία

b) Η βελτιστοποίηση των εμπορικών και επιχειρηματικών λειτουργιών

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, για παράδειγμα, ενισχύουν την επίγνωση της κατάστασης και διευκολύνουν μια πληθώρα λειτουργιών του πλοίου. Αυτά περιλαμβάνουν ανίχνευση ανωμαλιών για πλοήγηση, ακριβείς ελιγμούς και αποφυγή σύγκρουσης. Ένας άλλος σημαντικός τομέας εφαρμογής αφορά την παρακολούθηση των μηχανικών συστημάτων του πλοίου βάσει συνθηκών, παρόμοια με την προγνωστική συντήρηση. Επιπλέον, το ήθος της αυτοδιαχείρισης και οι αρχές του σχεδιασμού αυτόνομων συστημάτων, που περιλαμβάνουν την παρακολούθηση, τον έλεγχο, τη βελτιστοποίηση και την αυτονομία σε διάφορα επιχειρησιακά επίπεδα (που κυμαίνονται από 0 έως 5 ή 6) και λειτουργικούς τομείς των πλοίων, συμπεριλαμβανομένης της ναυσιπλοΐας και του χειρισμού φορτίου, αποκτούν ύψιστη σημασία. Ουσιαστικά, ένα αυτόνομο πλοίο λειτουργεί σχολαστικά από ένα επίγειο κέντρο επιτήρησης και ελέγχου, πολύπλοκα συνδεδεμένο με μια μεγάλη γκάμα ψηφιακών τεχνολογιών. Αυτά περιλαμβάνουν το IoT, την τεχνολογία ανάλυσης δεδομένων και την ευρυζωνική επικοινωνία υψηλής ταχύτητας. Είναι αξιοσημείωτο να γίνει διάκριση μεταξύ πλοίων υψηλής αυτοματοποίησης (αυτόνομα) και εκείνων που υπόκεινται σε τηλεχειρισμό ή στην εξ αποστάσεως διαχείριση συγκεκριμένων εργασιών επί του πλοίου, όπως οι λειτουργίες πλοίων και η διαχείριση φορτίου (Jokioinen, 2017).

Το παράδειγμα της έξυπνης ναυτιλίας συνδέεται εγγενώς με τη βελτιστοποίηση των εμπορικών και επιχειρηματικών λειτουργιών μέσα από το πρίσμα του Α.Ι. Αυτό περιλαμβάνει ένα πλήθος τομέων εφαρμογής που λειτουργούν στη τακτική κλίμακα διαχείρισης της ναυτιλίας. Αυτοί οι τομείς περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση περιουσιακών στοιχείων, τον σχεδιασμό στόλου, τον προγραμματισμό υπηρεσιών και τη ναύλωση. Περαιτέρω, η Α.Ι. παρέχει την υποστήριξη στην παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας και την αυστηρή τήρηση των περιβαλλοντικών κανονισμών. Σε στρατηγικό επίπεδο, οι έξυπνες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου του λογισμικού για την παρακολούθηση των ναυτιλιακών αγορών και των εξατομικευμένων ψηφιακών βοηθών, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αναμόρφωση του τοπίου των ναυτιλιακών εργασιών (Loebbecke et al., 2015).

#### 5.4 Blockchains στην εφοδιαστική αλυσίδα και στο εμπόριο

Η τεχνολογία Blockchain έχει αναδειχθεί ως μια μεταμορφωτική δύναμη στη ναυτιλιακή βιομηχανία, όπως τεκμηριώνεται από την ανάπτυξη και τις αυστηρές δοκιμές πολλών συστημάτων. Υποδειγματικές πλατφόρμες, συμπεριλαμβανομένων των TradeLens, Insurwave και CargoX, έχουν ξεπεράσει την πειραματική φάση και είναι πλέον πλήρως λειτουργικές σε εμπορικά περιβάλλοντα. Τα blockchains ναυτιλιακών επιχειρήσεων, που βασίζονται στις αρχές των έξυπνων συμβολαίων, έχουν σχεδιαστεί σχολαστικά για να λειτουργούν σε επιτρεπόμενες (ιδιωτικές) πλατφόρμες. Αυτά τα συστήματα χρησιμεύουν ως η βάση για την ψηφιοποίηση των διαδικασιών τεκμηρίωσης του εμπορίου, προαναγγέλλοντας μια νέα εποχή λειτουργικής αποτελεσματικότητας και διαφάνειας.

Συγκεκριμένα, οι εφαρμογές της τεχνολογίας blockchain επεκτείνονται σε blockchain με δυνατότητα IoT, οι οποίες περιλαμβάνουν την παρακολούθηση φορτίου και μηχανημάτων πλοίων. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί πρωτοποριακές συναλλαγές, συμπεριλαμβανομένων των υπηρεσιών κρυπτονομισμάτων ναυτιλίας που βασίζονται σε blockchain.

Η θεμελιώδης τεχνολογική υποδομή που στηρίζει τα blockchain ναυτιλιακών επιχειρήσεων είναι σταθερά βασισμένη σε πλατφόρμες όπως το Hyperledger Fabric, το Enterprise Ethereum και το R3-Corda Enterprise. Αυτές οι πλατφόρμες, που βρίσκονται εντός του επιπέδου υποδομής, χρησιμεύουν ως το θεμέλιο για την ανάπτυξη και την λειτουργία των blockchains ναυτιλιακών επιχειρήσεων και διαμορφώνουν το πλαίσιο της εφαρμογής. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς εξέλιξης και τα επόμενα χρόνια δύναται να εξελιχθεί στην σημαντικότερη μορφή ψηφιοποιημένων εμπορικών συναλλαγών στην ναυτιλία (Pilkington το 2016) (Sternberg et al 2018).

Οι ναυτιλιακές εφαρμογές blockchain υπόκεινται σε μια συνεχή διαδικασία βελτίωσης, με στόχο την πλήρη αξιοποίηση του μετασχηματιστικού δυναμικού αυτής της τεχνολογίας. Ο μετασχηματισμός αυτός εκτείνεται πέρα από τις σταδιακές βελτιώσεις στη διαχείριση λειτουργιών «χωρίς χαρτί» ή αλλιώς «στην απλή διανομή» (και όχι πραγματική αποκέντρωση) της διαχείρισης φυσικών περιουσιακών στοιχείων. Ένα καινοτόμο επιχειρηματικό μοντέλο, γνωστό ως Κατανεμημένοι Αυτόνομοι Οργανισμοί, το οποίο βασίζεται στην αλγοριθμική διαχείριση, είναι έτοιμο να συγχωνευθεί με τις προαναφερθείσες τεχνολογίες (IoT, 5G, A.I. και blockchain), προαναγγέλλοντας την επικείμενη εποχή των αυτόνομων λύσεων. Αυτή η πρωτοποριακή σύγκλιση αντιπροσωπεύει ένα νέο σύνορο για τη ναυτιλιακή βιομηχανία, με τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στη διαχείριση και λειτουργία των ναυτιλιακών επιχειρήσεων στο εγγύς μέλλον.

## 5.5 Κατάσταση πρακτικής και διαθέσιμες τεχνολογίες (AI, ML)

Η ναυτιλιακή βιομηχανία υφίσταται σημαντικό μετασχηματισμό με την έλευση της έξυπνης ναυτιλίας. Αυτή η εξέλιξη αξιοποιεί τις δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης (AI), της μηχανικής μάθησης (ML) και της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων. Αυτές οι τεχνολογίες εφαρμόζονται σε διάφορες πτυχές των θαλάσσιων επιχειρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων θαλάσσιων μεταφορών, της παρακολούθησης της κυκλοφορίας και των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για κρίσιμα σενάρια. Το ειδικό τεύχος του *Journal of Marine Science and Engineering* με θέμα «Ευφυής και Ασφαλής Ναυσιπλοΐα» ασχολείται με αυτές τις εξελίξεις. Αναφέρεται μεταξύ άλλων η ενοποίηση δεδομένων πολλαπλών πηγών, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων, η μοντελοποίηση θαλάσσιας κυκλοφορίας, η έξυπνη παρακολούθηση της κυκλοφορίας και οι προληπτικές μέθοδοι μετριάσμου του κινδύνου (*Journal of Marine Science and Engineering*, 2023).

- **Αυτόνομη Ναυτιλία:** Το AI και το ML είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη αυτόνομων πλοίων. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν σε πλοία και σκάφη να πλοηγούνται με ακρίβεια, να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο και να βελτιστοποιούν τις λειτουργίες τους. Αυτή η εξέλιξη όχι μόνο αυξάνει την αποτελεσματικότητα και μειώνει το ανθρώπινο λάθος, αλλά έχει επίσης τη δυνατότητα να μειώσει το λειτουργικό κόστος (Spire, 2023).
- **Προγνωστική Ανάλυση Δεδομένων (Predictive Data Analytics):** Εταιρείες όπως η Freightflows χρησιμοποιούν AI και ML για να παρέχουν προγνωστικά αναλυτικά στοιχεία, τα οποία περιλαμβάνουν ανάλυση ιστορικών δεδομένων AIS για προβλέψεις συμπεριφοράς πλοίων, δραστηριότητες λιμένων και απόδοση της αγοράς. Αυτή η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης συμβάλλει σημαντικά στον στρατηγικό σχεδιασμό και την πρόβλεψη στη ναυτιλία (Spire, 2023).
- **Καινοτόμος Σχεδιασμός Ταξιδιών:** Εταιρείες όπως η Trabus Technologies χρησιμοποιούν προηγμένες μεθόδους που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη για τον προγραμματισμό ταξιδιών, εφαρμόζοντας εξελιγμένες προσεγγίσεις που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια των θαλάσσιων διαδρομών (Spire, 2023).
- **AI στην Ανάλυση και Πρόβλεψη Επενδύσεων στη Ναυτική Βιομηχανία:** Η Wärtsilä, μέσω του «Project Horizon» της, αναπτύσσει ένα μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης για να προβλέψει το προφίλ των πιθανών επενδύσεων στη ναυτιλία. Αυτό το μοντέλο αξιοποιεί ιστορικά δεδομένα και διάφορους προγνωστικούς δείκτες για να βοηθήσει στις στρατηγικές μάρκετινγκ και πωλήσεων (Wartsila, 2019).

- Ενίσχυση της Επιχειρησιακής Αποδοτικότητας: Οι νεοσύστατες εταιρείες όπως το Captain AI και η Metis Cyberspace Technology χρησιμοποιούν προσομοιώσεις βάσει τεχνητής νοημοσύνης και αλγόριθμους ML για αυτόνομη λειτουργία πλοίου, ανάλυση απόδοσης περιουσιακών στοιχείων και βελτιστοποίηση του ενεργειακού κόστους. Αυτές οι εφαρμογές βοηθούν στη βελτίωση της επίγνωσης της κατάστασης και στη μείωση του λειτουργικού κόστους (Captain AI, 2023) (Metis Cybertechnology, 2023).
- Επιθεώρηση εμπορευματοκιβωτίων και βελτιστοποίηση λειτουργίας λιμένων: Εταιρείες όπως η Canscan αυτοματοποιούν την επιθεώρηση εμπορευματοκιβωτίων χρησιμοποιώντας λογισμικό που βασίζεται σε τεχνητή νοημοσύνη, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια στο χειρισμό εμπορευματοκιβωτίων (Canscan, 2023).
- Βελτιστοποίηση ταξιδιού και παρακολούθηση απόδοσης: Η Marine Digital έχει αναπτύξει εργαλεία που αξιοποιούν αλγόριθμους ML για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης καυσίμου, του κόστους ταξιδιού και της χάραξης διαδρομών, μετατρέποντας τα δεδομένα αισθητήρων σε δομημένες πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων (Alexey Fitiskin, 2021).
- Τεχνητή Νοημοσύνη για χειριστές λιμένων: Γερανοί, ρομποτική και εργαλεία αυτοματισμού που ενσωματώνουν τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιούνται από τους χειριστές λιμένων για τον εξορθολογισμό των λειτουργιών, τη μείωση του ανθρώπινου λάθους και την επιτάχυνση των διαδικασιών προγραμματισμού και επαναπρογραμματισμού (Owczarek, 2022).
- Εφαρμογές επιτήρησης και ασφάλειας: Η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση επιβατών, τον εντοπισμό παράνομης αλιείας, την αναγνώριση των κουρασμένων μελών του πληρώματος και την πρόληψη πυρκαγιών. Αυτά τα εργαλεία επιτήρησης και παρακολούθησης ενισχύουν σημαντικά την ασφάλεια στη θάλασσα (Primo Nautic, 2023).
- AI για την πρόβλεψη τάσεων λιμένων: Το Amazinum έχει εφαρμόσει AI και ML για να προβλέψει τις τάσεις που σχετίζονται με τα λιμάνια, χρησιμοποιώντας μοντέλα όπως το Prophet για την πρόβλεψη δεδομένων χρονοσειρών και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των λιμένων με βάση τις διακυμάνσεις και τις αποκλίσεις τιμών (Amazinum, 2023).

Πίνακας 17: Εκτίμηση TRL τεχνολογιών AI και ML στη ναυτιλία

Τεχνολογία	Εταιρεία	TRL	Περιγραφή	Λόγος Εκτίμησης TRL
Αυτόνομη Πλοήγηση Πλοίου	Spire	7-8	Ανάπτυξη αυτόνομων πλοίων με AI και ML για ακριβή πλοήγηση, αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο και βελτιστοποίηση λειτουργιών.	Η χρήση σε λειτουργικά περιβάλλοντα και η συνεχιζόμενη ανάπτυξη υποδεικνύουν υψηλό επίπεδο ωριμότητας, σύμφωνα με το TRL 7-8 (Spire, 2023).
Προβλεπτική Ανάλυση Δεδομένων	Freightflows	6-7	Μοντέλα AI και ML για ανάλυση ιστορικών δεδομένων AIS για πρόβλεψη συμπεριφοράς πλοίων, δραστηριότητες λιμανιών και απόδοση της αγοράς.	Εφαρμογή σε ανάλυση και πρόβλεψη πραγματικών δεδομένων, υποδεικνύοντας προχωρημένη ανάπτυξη και δοκιμές, αλλά όχι πλήρη λειτουργική ανάπτυξη (TRL 6-7) (Spire, 2023).
AI για Σχεδιασμό Πλεύσης	Trabus Technologies	6-7	Προηγμένες μέθοδοι AI για αποδοτικό και ασφαλή σχεδιασμό πλεύσης θαλάσσιων διαδρομών.	Χρήση σε πραγματικό σχεδιασμό πλεύσης με έμφαση σε αναλυτικά εργαλεία, υποδηλώνοντας σημαντική ανάπτυξη και δοκιμές σε περιβάλλον (TRL 6-7) (Spire, 2023).
AI για Πρόβλεψη Επενδύσεων	Wärtsilä	5-6	'Project Horizon' χρησιμοποιεί AI για πρόβλεψη πιθανών επενδύσεων σε πλοία με βάση ιστορικά δεδομένα και προγνωστικούς δείκτες.	Το έργο βρίσκεται σε φάση χρήσης μοντέλων AI για προβλέψεις, δείχνοντας μέτριο επίπεδο ωριμότητας (TRL 5-6) (Wartsila, 2019).
Επίγνωση Κατάστασης και Λειτουργική Αποδοτικότητα	Captain AI, Metis Cyberspace Technology	6-7	Προσομοιώσεις βασισμένες σε τεχνητή νοημοσύνη και αλγόριθμους ML για αυτόνομη λειτουργία πλοίου και ανάλυση απόδοσης περιουσιακών στοιχείων.	Αποδεδειγμένη χρήση για τη βελτίωση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας και της επίγνωσης κατάστασης, υποδεικνύοντας τη δοκιμή πρωτοτύπων σε σχετικά περιβάλλοντα (TRL 6-7) (Captain AI, 2023) (Metis Cybertechnology, 2023).
Αυτοματισμός Επιθεώρησης Κοντέινερ	Canscan	7-8	Σύστημα λογισμικού που διευθύνεται από AI για την αυτοματοποίηση της επιθεώρησης των φορτηγών κοντέινερ.	Λειτουργική χρήση στην αυτοματοποίηση της επιθεώρησης κοντέινερ, δείχνοντας υψηλό επίπεδο ωριμότητας και ανάπτυξης (TRL 7-8) (Canscan, 2023).
Βελτιστοποίηση και Παρακολούθηση Πλεύσης	Marine Digital	6-7	Αλγόριθμοι ML για αποδοτικότητα καυσίμων, βελτιστοποίηση κόστους πλεύσης και βέλτιστο σχεδιασμό διαδρομής χρησιμοποιώντας αισθητήρες και εξωτερικά δεδομένα.	Εφαρμογή στην παρακολούθηση απόδοσης σκαφών, υποδηλώνοντας προχωρημένη δοκιμή πρωτότυπων και κάποια λειτουργική χρήση (TRL 6-7) (Alexey Fitiskin, 2021).
Αυτοματισμός Λειτουργίας Λιμένα	nexocode	7-8	Αυτοματισμός γερανών και εργαλεία αυτοματισμού για την απλοποίηση λειτουργιών λιμένα.	Χρήση σε πραγματικές λειτουργίες λιμένα για την απλοποίηση διαδικασιών. Επιχειρησιακή ανάπτυξη και υψηλή ωριμότητα (TRL 7-8) (Owczarek, 2022).
Ασφάλεια και Επιτήρηση	Primo Nautic	6-7	Εργαλεία AI για την παρακολούθηση επιβατών, την	Εφαρμογή στην ενίσχυση της ασφάλειας και της επιτήρησης σε

Τεχνολογία	Εταιρεία	TRL	Περιγραφή	Λόγος Εκτίμησης TRL
			ταυτοποίηση παράνομων δραστηριοτήτων και την ενίσχυση της θαλάσσιας ασφάλειας.	Θαλάσσια περιβάλλοντα. Σημαντική ανάπτυξη και δοκιμές (TRL 6-7) (Primo Nautic, 2023).
Πρόβλεψη Τάσεων Λιμένα	Amazinum	5-6	AI και ML για την πρόβλεψη τάσεων σχετικών με τον λιμένα και τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του λιμένα.	Στάδιο ανάπτυξης επικεντρωμένο στην πρόβλεψη τάσεων. Μεσαίο επίπεδο ωριμότητας και δοκιμές πρωτοτύπου (TRL 5-6) (Amazinum, 2023).

## 5.6 Προηγμένες τεχνολογίες - Προκλήσεις

Η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιμετωπίζει ένα πλήθος περίπλοκων προκλήσεων καθώς ολοένα εφαρμόζει προηγμένες τεχνολογίες νοημοσύνης. Αυτές οι προκλήσεις περιλαμβάνουν διάφορες διαστάσεις, που κυμαίνονται από την τεχνολογική πολυπλοκότητα έως τις επιταγές βιωσιμότητας, οι οποίες είναι όλες κρίσιμες για τη διαμόρφωση του μέλλοντος των ναυτιλιακών επιχειρήσεων.

Προκλήσεις τεχνολογικής ολοκλήρωσης και ψηφιοποίησης:

- **Υπερφόρτωση πληροφοριών:** Η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών, πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) έχει τη δυνατότητα να κατακλύσει τους ναυτιλιακούς φορείς με δεδομένα, οδηγώντας σε μειωμένη επίγνωση της κατάστασης και προκλήσεις λήψης αποφάσεων (Emerald Insight).
- **Ανισότητες ψηφιοποίησης:** Η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών δεν είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρο τον ναυτιλιακό τομέα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν ανισότητες στην εφαρμογή και την ολοκλήρωση της τεχνολογίας. Αυτή η ποικιλομορφία απαιτεί προσεκτική διαχείριση για τη διασφάλιση συνεπών προτύπων σε ολόκληρο τον κλάδο (Zhang et al., 2018).

Αυτόνομη Πλοήγηση και Εφαρμογή AI:

- **Ασφάλεια και αξιοπιστία:** Η ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων πλοήγησης εισάγει προκλήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια και την αξιοπιστία. Η διασφάλιση της ευρωστίας των αυτόνομων συστημάτων σε δυναμικά θαλάσσια περιβάλλοντα είναι πρωταρχικής σημασίας για τη λειτουργική αποτελεσματικότητα και ασφάλεια.
- **Ηθικά ζητήματα:** Οι επιχειρήσεις μη επανδρωμένων σκαφών και πλοίων εγείρουν ηθικά ερωτήματα και απαιτούν σαφείς κατευθυντήριες γραμμές για την



αντιμετώπιση ζητημάτων όπως η λογοδοσία και η ευθύνη σε αυτόνομες θαλάσσιες συνθήκες.

Διαχείριση μεγάλων δεδομένων και προγνωστική ανάλυση:

- Πολυπλοκότητα δεδομένων: Η διαχείριση των τεράστιων και ποικίλων δεδομένων που παράγονται από τις θαλάσσιες δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης πλοίων και σκαφών, της διαχείρισης φορτίου και της παρακολούθησης του πληρώματος, αποτελεί σημαντική πρόκληση. Η αποτελεσματική χρήση αυτών των δεδομένων απαιτεί προηγμένα αναλυτικά εργαλεία.
- Πρόβλεψη για την εξισορρόπηση της συντήρησης: Ενώ η προγνωστική συντήρηση προσφέρει σημαντικά οφέλη, εισάγει κινδύνους για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο. Η επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των προγνωστικών αναλυτικών στοιχείων και της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των κρίσιμων θαλάσσιων υποδομών.

Περιβαλλοντική βιωσιμότητα και κανονιστική συμμόρφωση:

- Ρυθμιστική πολυπλοκότητα: Η τήρηση αυστηρών περιβαλλοντικών κανονισμών, συμπεριλαμβανομένων πρωτοβουλιών όπως το IMO 2020, παρουσιάζει περίπλοκες προκλήσεις. Οι κανονισμοί αυτοί στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών και στην ενίσχυση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας στον ναυτιλιακό τομέα.
- Επιπτώσεις COVID-19: Η πανδημία COVID-19 έχει διαταράξει τις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού και τις θαλάσσιες δραστηριότητες, προσθέτοντας ένα επιπλέον επίπεδο πολυπλοκότητας στις προσπάθειες συμμόρφωσης και τον επιχειρησιακό σχεδιασμό.

Οικονομική και Λειτουργική Αποτελεσματικότητα:

- Διαχείριση Κόστους: Η διαχείριση του κόστους, ειδικά ενόψει σημαντικών επενδύσεων πληροφορικής και ανάπτυξης ψηφιακής υποδομής, αποτελεί κεντρική πρόκληση. Η ναυτιλιακή βιομηχανία επιδιώκει να βελτιστοποιήσει τη λειτουργική αποτελεσματικότητα, διασφαλίζοντας παράλληλα τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας.
- Βελτίωση Ποιότητας: Η βελτίωση της ποιότητας των λιμενικών υπηρεσιών και η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων αποτελούν βασικές στρατηγικές για την αντιμετώπιση των οικονομικών προκλήσεων με παράλληλη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας.

Οι προκλήσεις στην προηγμένη παρακολούθηση, έλεγχο και νοημοσύνη στη ναυτιλία υπογραμμίζουν την πολύπλευρη φύση του μετασχηματισμού της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που να περιλαμβάνει την τεχνολογική καινοτομία, τη στρατηγική διαχείριση και μια σταθερή δέσμευση για βιωσιμότητα και λειτουργική αποτελεσματικότητα.

## 5.7 Πρωτοποριακά Έργα στην Αυτόνομη Ναυτιλία

Η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται στο κατώφλι μιας επαναστατικής αλλαγής, οδηγούμενη από μια σειρά πρωτοποριακών έργων αυτόνομων πλοίων. Αυτές οι πρωτοβουλίες αποτελούν συγχώνευση της ναυτικής παράδοσης και της τεχνολογικής καινοτομίας και επαναπροσδιορίζουν τα όρια των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων. Ενσωματώνουν μια δέσμευση για την ενίσχυση της ασφάλειας, την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και την προώθηση της βιωσιμότητας. Από πλήρως αυτόνομα πλοία έως προηγμένα συστήματα πλοήγησης που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη, κάθε έργο αντιπροσωπεύει μια μοναδική συμβολή στη συνεχή εξέλιξη της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Τα παρακάτω είναι μερικά από τα πιο αξιοσημείωτα πρόσφατα έργα αυτόνομων πλοίων, καθένα από τα οποία απεικονίζει τις διαφορετικές εφαρμογές και τις δυνατότητες αυτής της ταχέως εξελισσόμενης τεχνολογίας.

### 5.7.1 Yara Birkeland

Πρόκειται για μια κοινοπραξία μεταξύ της Yara International και της Kongsberg, το Yara Birkeland είναι ένα πρωτοποριακό έργο στον τομέα των μηδενικών εκπομπών και των αυτόνομων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Το πλοίο αυτό σηματοδοτεί τη μεταστροφή από τις οδικές στις θαλάσσιες μεταφορές, μειώνοντας σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Το πλοίο έχει μήκος 80 μέτρα, κατάρτι 14,8 μέτρα και βάθος 12 μέτρα. Προτεινόμενη ταχύτητα πλεύσης είναι οι 6 κόμβων και μπορεί να φτάσει σε μέγιστη ταχύτητα 15 κόμβων. Το Yara Birkeland τροφοδοτείται από ηλεκτρικούς κινητήρες που κινούν δύο υποδοχές αζιμουθίου και δύο προωθητές σήραγγας, με μπαταρίες που παρέχουν χωρητικότητα 6,7 MWh.

Με χωρητικότητα 120 TEU (Ισοδύναμη μονάδα είκοσι ποδιών), μεταφέρει κυρίως λίπασμα μεταξύ Herøya και Brevik στη Νορβηγία. Στόχος είναι η μείωση των 40.000 ταξιδιών με φορτηγά ντίζελ ετησίως, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> (Skredderberget, 2023)

Η Kongsberg Maritime συνέβαλε καθοριστικά στην ανάπτυξη και την παράδοση των βασικών τεχνολογιών για το Yara Birkeland, συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων για απομακρυσμένες και αυτόνομες λειτουργίες, ηλεκτρική κίνηση, μπαταρία και συστήματα ελέγχου πρόωσης. Το πλοίο είναι εξοπλισμένο με κάμερες, ραντάρ και συστήματα AI για ανίχνευση εμποδίων και πλοήγηση.

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του τον Νοέμβριο του 2020, το Yara Birkeland εισήλθε σε μια φάση αυστηρών δοκιμών. Αρχικά λειτουργώντας με πλήρες πλήρωμα, το σχέδιο είναι σταδιακά να στραφεί προς την πλήρη αυτονομία, συμπεριλαμβανομένης της αυτόνομης πλοήγησης και της φόρτωσης/εκφόρτωσης φορτίου (Maritime Executive, 2022).

Σε ευθυγράμμιση με τους στόχους βιωσιμότητας, το Yara Birkeland στοχεύει να αλλάξει τους κανόνες στις θαλάσσιες μεταφορές. Υπάρχουν σχέδια να τροφοδοτηθεί με αμμωνία, αξιοποιώντας αυτήν την πηγή καυσίμου μηδενικού άνθρακα για την κίνηση του.

Το έργο έχει κερδίσει τη προσοχή, καθώς είναι φιναλίστ στον διαγωνισμό Nor-Shipping Next Generation Ship το 2019. Χρησιμεύει ως απόδειξη της ιδέας για πλήρως αυτόνομα πλοία ικανά να ταξιδεύουν σε παγκόσμιο επίπεδο, από επιχειρήσεις βιομηχανικών εγκαταστάσεων έως λιμενικές λειτουργίες. Η νορβηγική κυβέρνηση συνέβαλε σημαντικά στο έργο, παρέχοντας επιχορήγηση που καλύπτει περίπου το ένα τρίτο του συνολικού κόστους κατασκευής (Lavars, 2021).



Εικόνα 52: Το Yara Birkeland καθ' οδόν προς τη Νορβηγία (Lavars, 2021)

### 5.7.2 MEGURI2040

Το έργο MEGURI2040 προσανατολίζεται στην πλήρη εμπορευματοποίηση της τεχνολογίας πλήρως αυτόνομων πλοίων έως το 2025. Αυτός ο φιλόδοξος στόχος ακολουθεί την επιτυχή ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου και έχει εισέλθει πλέον στη δεύτερη φάση ανάπτυξής του. Το έργο περιλαμβάνει συνεργασίες μεταξύ 50 και πλέον ιαπωνικών εταιρειών, συμπεριλαμβανομένων σημαντικών παικτών όπως η Furuno Electric Co., Ltd., η Japan Marine Science Inc. και οι εταιρείες του Ομίλου NYK. Αυτές οι οντότητες συνεργάζονται στο πλαίσιο της κοινοπραξίας Designing the Future of Fully Autonomous Ships Plus (DFFAS+).

Οι κοινοπραξίες αναπτύσσουν υπερσύγχρονα συστήματα αυτόνομης πλοήγησης για διαφορετικούς τύπους πλοίων, συμπεριλαμβανομένων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και οχηματαγωγών. Ο σκοπός εστιάζει στην ενσωμάτωση τεχνολογιών για την αυτοματοποιημένη πλοήγηση εντός των λιμανιών, τον αυτοματοποιημένο ελλιμενισμό και τη χρήση drones για υποστήριξη ελλιμενισμού πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Nippon Foundation, 2022).

Το έργο διεξήγαγε αρκετές επιτυχείς δοκιμές επίδειξης χρησιμοποιώντας μεγάλα σκάφη σε μεγάλες αποστάσεις και μέσω συμφορημένων θαλάσσιων λωρίδων. Αυτές οι δοκιμές είναι κρίσιμες για την επικύρωση των αναπτυγμένων τεχνολογιών και την πρακτική εφαρμογή τους.

Η Furuno Electric Company διαδραματίζει βασικό ρόλο στο έργο, προμηθεύοντας προηγμένα ηλεκτρονικά ναυτιλιακά για τα αυτόνομα πλοία. Αυτό περιλαμβάνει εξοπλισμό όπως το FAR3000 Chart Radar, το FMD3200 ECDIS και το FE800 IMO Echo Sounder, όλα ενσωματωμένα μέσω μιας Μονάδας Σχεδιασμού Δράσης (APU) για την επεξεργασία ενεργειών πλοήγησης με βάση δεδομένα αισθητήρα.

Ένας σημαντικός στόχος είναι να τελειοποιηθούν και να τυποποιηθούν οι ανεπτυγμένες τεχνολογίες σε διεθνή πρότυπα, ενισχύοντας έτσι τη ναυτιλιακή βιομηχανία της Ιαπωνίας και τον κορυφαίο διεθνή ανταγωνισμό στην πλήρως αυτόνομη τεχνολογία πλοίων (Furuno, 2023).

Η αναβάθμιση και η βελτίωση της τεχνολογίας προσομοίωσης και η γενίκευση των αξιολογήσεων κινδύνου αποτελούν μέρος της ενίσχυσης της υποδομής της διαδικασίας ανάπτυξης που δημιουργήθηκε στο πρώτο στάδιο.

Το έργο εστιάζει επίσης στη δημιουργία του συστήματος πιστοποίησης που απαιτείται για την εμπορευματοποίηση της διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένων των αυτόνομων συστημάτων πλοήγησης και επίγειας παρακολούθησης.

Το έργο MEGURI2040 δεν είναι μόνο μια τεχνολογική προσπάθεια, αλλά στοχεύει επίσης στην αντιμετώπιση κοινωνικών ζητημάτων στον κλάδο της ναυτιλίας της Ιαπωνίας. Αυτό

περιλαμβάνει τη μείωση των ελλείψεων εργατικού δυναμικού, την πρόληψη των θαλάσσιων ατυχημάτων και τη διατήρηση των απομακρυσμένων νησιωτικών δρομολογίων. Υποστηρίζοντας σταθερές εγχώριες υποδομές εφοδιαστικής και μεταφορών, το Nirron Foundation, οι εταιρείες που συμμετέχουν στο DFFAS+ και οι διεθνείς οργανισμοί εταίροι εργάζονται από κοινού για την επίτευξη αυτών των στόχων (News Maritime Network, 2023). Συνοπτικά, το έργο MEGURI2040 είναι μια ολοκληρωμένη και συλλογική προσπάθεια που στοχεύει στην επανάσταση στη ναυτιλιακή βιομηχανία μέσω της ανάπτυξης και της εμπορευματοποίησης πλήρως αυτόνομων πλοίων. Η επιτυχία του θα μπορούσε να έχει εκτεταμένες επιπτώσεις για τις παγκόσμιες ναυτιλιακές πρακτικές, την ασφάλεια στη θάλασσα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.



Εικόνα 53: Sunflower Shiretoko, μεγάλο οχηματαγωγό άνω των 10.000 τόνων που χρησιμοποιείται για δοκιμές επίδειξης (Nirron Foundation, 2022)

### 5.7.3 SEAMLESS

Το έργο SEAMLESS (Safe, Efficient and Autonomous: Multimodal Library of European Shortsea and Inland Solutions) είναι μια φιλόδοξη πρωτοβουλία που στοχεύει να φέρει επανάσταση στις υπηρεσίες θαλάσσιων εμπορευματικών μεταφορών στην Ευρώπη. Αυτό το έργο αποτελεί μέρος του προγράμματος έρευνας και καινοτομίας Horizon Europe της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που συγκεντρώνει 26 εταιρείες από 12 χώρες. Η βασική εστίαση του SEAMLESS είναι η ανάπτυξη και η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών για τη δημιουργία πλήρως αυτοματοποιημένων, οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμων υπηρεσιών για τις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων (Short Sea Shipping, SSS) και τις εσωτερικές πλωτές μεταφορές (Inland Waterways Transport, IWT) (Colella, et al., 2023).

Το έργο εστιάζει στην προσαρμογή και τη δημιουργία των απαραίτητων τεχνολογικών δομικών στοιχείων για την αυτόνομη ναυτιλία. Αυτό περιλαμβάνει προόδους στα συστήματα πλοήγησης, διαχείρισης φορτίου και διαχείρισης ενέργειας.

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους του SEAMLESS είναι η μετατόπιση των εμπορευμάτων από τους δρόμους σε πλωτές οδούς, ελαχιστοποιώντας έτσι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το έργο στοχεύει στην ανάπτυξη συστημάτων που δεν είναι μόνο αποτελεσματικά αλλά έχουν και ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Το έργο σχεδιάζει να ενσωματώσει νέες τεχνολογίες στα υπάρχοντα συστήματα ναυτιλίας και εφοδιαστικής. Αναμένονται επιδείξεις πλήρους κλίμακας σε σενάρια πραγματικού χρόνου, που συνδυάζουν τόσο φυσικά όσο και ψηφιακά στοιχεία που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του έργου.

Μια κρίσιμη πτυχή του SEAMLESS είναι η διασφάλιση ότι η ανεπτυγμένη αυτόνομη υπηρεσία μεταφοράς εμπορευμάτων δεν είναι μόνο τεχνολογικά προηγμένη αλλά και οικονομικά βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική. Το SEAMLESS περιλαμβάνει επίσης την εξερεύνηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων και την ευθυγράμμιση με τα ρυθμιστικά πλαίσια που είναι απαραίτητα για την υλοποίηση των αυτόνομων ναυτιλιακών υπηρεσιών. Αυτό ενσωματώνει τον εντοπισμό ρυθμιστικών κενών και προκλήσεων και την παροχή συστάσεων για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής.

Το έργο συγκεντρώνει μια ποικιλόμορφη κοινοπραξία, συμπεριλαμβανομένων ναυτιλιακών πανεπιστημίων, λιμένων, εταιρειών τεχνολογίας και διαφόρων ενδιαφερομένων οργανισμών. Συντονίζεται από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, η κοινοπραξία περιλαμβάνει αξιόλογους συμμετέχοντες όπως το Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Delft, το Bergen Havn και το Kongsberg Maritime. Η κοινοπραξία SEAMLESS έχει δεσμευτεί για τη διάδοση, την επικοινωνία και την εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων της με μεγάλο αντίκτυπο, με στόχο να επηρεάσει τις μελλοντικές τάσεις και την καινοτομία στην αυτονομία και τα έξυπνα logistics (O'Dwyer, 2023) (Seamless Project, 2023).

#### 5.7.4 HiNAS 2.0

Το έργο HiNAS 2.0, με επικεφαλής την Hyundai Heavy Industries (HHI) και τη θυγατρική της Anikis, αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα της αυτόνομης ναυτιλίας. Αυτό το έργο στοχεύει στην εμπορευματοποίηση ενός αυτόνομου συστήματος πλοήγησης Επιπέδου 2, προχωρώντας πέρα από τα σημερινά συστήματα Επιπέδου 1 που είναι κυρίως διαθέσιμα στην αγορά.

Το HiNAS 2.0 αξιοποιεί την τεχνητή νοημοσύνη για να ελέγχει αυτόνομα το τιμόνι και την ταχύτητα ενός πλοίου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό περιλαμβάνει τη δυνατότητα αναγνώρισης του περιβάλλοντος, όπως οι καιρικές συνθήκες και τα κοντινά πλοία, και η ανάλογη λήψη αποφάσεων πλοήγησης. Το σύστημα χρησιμοποιεί επαυξημένη πραγματικότητα



(Augmented Reality, AR) για να καθοδηγήσει με βέλτιστες διαδρομές και ταχύτητες. Οι λειτουργίες αναγνώρισης και κρίσης καταστάσεων που βασίζονται σε συστήματα μηχανικής μάθησης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφαλούς πλοήγησης και αποφυγής σύγκρουσης (Maritime Executive, 2022).

Το HiNAS 2.0 έχει σχεδιαστεί για τη βελτίωση της απόδοσης καυσίμου και τη μείωση του λειτουργικού φόρτου στις ομάδες γεφυρών. Αυτό συμβάλλει τόσο σε οικονομικά όσο και σε περιβαλλοντικά οφέλη. Το σύστημα έχει αναπτυχθεί με έμφαση στην ασφάλεια, με στόχο τη μείωση των θαλάσσιων ατυχημάτων και των ατμοσφαιρικών ρύπων. Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του ευθυγραμμίζονται με τους υπάρχοντες κανόνες, τα εκάστοτε εγχώρια και διεθνή πρότυπα.

Υπάρχουν σχέδια για την εγκατάσταση του HiNAS 2.0 σε 23 μεγάλα πλοία, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και των μεταφορέων LNG, από τον Αύγουστο του 2023. Αυτό σηματοδοτεί ένα ουσιαστικό βήμα προς την ενσωμάτωση της τεχνολογίας αυτόνομης πλοήγησης στις εμπορικές θαλάσσιες δραστηριότητες (Riviera News, 2022) (Digital Ship, 2022).

#### 5.7.5 Mayflower Autonomous Ship (MAS)

Το έργο Mayflower Autonomous Ship (MAS), με επικεφαλής τον οργανισμό θαλάσσιων ερευνών ProMare και την IBM ως κύριο τεχνολογικό και επιστημονικό εταίρο, αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ορόσημο στην αυτόνομη θαλάσσια έρευνα. Το MAS400, ένα πλήρως αυτόνομο θαλάσσιο ερευνητικό σκάφος με κινητήρα τεχνητής νοημοσύνης, έχει ξεκινήσει πρωτοποριακά ταξίδια, συμπεριλαμβανομένων προσπαθειών να διασχίσει τον Ατλαντικό Ωκεανό.

Το MAS400 είναι ένα σκάφος χωρίς πλήρωμα που λειτουργεί με τεχνητή νοημοσύνη και έχει σχεδιαστεί για να πλοηγείται αυτόνομα χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες υπολογιστών. Οι δυνατότητές του περιλαμβάνουν βέλτιστο προσδιορισμό διαδρομής και ταχύτητας, παρακολούθηση περιβάλλοντος και αποφυγή σύγκρουσης.

Το έργο έχει κάνει πολλές προσπάθειες να διασχίσει τον Ατλαντικό. Η πρώτη προσπάθεια τον Ιούνιο του 2021 σταμάτησε λόγω μηχανικών προβλημάτων και η δεύτερη προσπάθεια ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2022. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου ταξιδιού, το MAS400 ανέπτυξε πρόβλημα φόρτισης με τις μπαταρίες εκκίνησης της γεννήτριας, που το οδήγησε σε εκτροπή στο Χάλιφαξ της Νέας Σκωτίας.

Το MAS400 είναι ένα trimaran αλουμινίου μήκους 15 μέτρων, κυρίως ηλιακής ενέργειας και ικανό για ταχύτητες έως και 10 κόμβους. Διαθέτει επίσης εφεδρική γεννήτρια ντίζελ. Η κατασκευή του πλοίου κόστισε περίπου 1,3 εκατομμύρια δολάρια.

Η αποστολή του MAS400 περιλαμβάνει τη δειγματοληψία νερού για ρύπους, τη μελέτη της θαλάσσιας ζωής και τη δοκιμή των υπολογιστικών συστημάτων του. Το έργο Mayflower Autonomous Ship αποτελεί παράδειγμα της καινοτομίας στη ναυτιλιακή τεχνολογία, ανοίγοντας το δρόμο για μελλοντικές εξελίξεις στην αυτόνομη ναυτιλία και την ωκεάνια έρευνα (Newsroom, 2023) (Mayflower Autonomous Ship, 2023)



Εικόνα 54: Το MAS400 κατά την διάρκεια δοκιμαστικής λειτουργίας (Mayflower Autonomous Ship, 2023)

#### 5.7.6 Orca AI

Το Orca AI είναι ένα σημαντικό σύστημα στην τεχνολογία ασφάλειας, που έχει σχεδιαστεί για να βελτιώνει την επίγνωση της κατάστασης πλεύσης και να μειώνει τον κίνδυνο συγκρούσεων στη θάλασσα. Αυτό το σύστημα υιοθετείται όλο και περισσότερο από μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες για την ικανότητά του να βελτιώνει τη λειτουργική ασφάλεια. Το Orca AI χρησιμεύει ως αυτοματοποιημένη επιφυλακή, χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη για την αναγνώριση επικίνδυνων στόχων ή/και άλλων σκαφών. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ύδατα χαμηλής ορατότητας και συμφόρησης, όπου μπορεί να ανιχνεύσει πιθανούς κινδύνους που πιθανώς να παραβλεφθούν από το ανθρώπινο μάτι.

Η πλατφόρμα Orca AI έχει αποδείξει την αποτελεσματικότητά της στη μείωση της πιθανότητας ναυτικών συμβάντων. Χρησιμοποιεί ανίχνευση, παρακολούθηση και εκτίμηση εμβέλειας άλλων σκαφών σε πραγματικό χρόνο μέσω του προηγμένου συστήματος κάμερας, παρέχοντας πανοραμική θέα για ολοκληρωμένη παρακολούθηση (ORCA AI, 2023).

Μια μελέτη των αποτελεσμάτων της ναυσιπλοΐας σε πλοία εξοπλισμένα με το σύστημα Orca AI έδειξε μείωση 27% στα συμβάντα σύγκρουσης και 22% μείωση στους απότομους ελιγμούς. Αυτά τα δεδομένα, που συγκεντρώθηκαν από 110 δεξαμενόπλοια, boxships,



bulkers και Ro/Ro πλοία, υπογραμμίζουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος στη βελτίωση της ασφάλειας πλοήγησης και στη μείωση του κινδύνου συγκρούσεων.

Εκτός από τη βελτίωση της ασφάλειας, η μείωση των απότομων ελιγμών και των αλλαγών ταχύτητας συνέβαλε επίσης στη σημαντική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, με αποτέλεσμα την ευθυγράμμιση με τους κλιματικούς στόχους και την ενίσχυση της απόδοσης του Δείκτη Έντασης Άνθρακα (CII) των πλοίων.

Εταιρείες όπως ο ιαπωνικός ναυτιλιακός γίγαντας NYK αποφάσισαν να εφαρμόσουν το σύστημα Orca AI σε όλο τον στόλο τους, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, των δεξαμενόπλοιων και των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Αυτό ακολουθεί επιτυχημένες δοκιμές και συνεργασίες σε έργα όπως το MEGURI2040 Project, όπου ένα αυτόνομο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 749 μεικτών τόνων εξοπλισμένο με τεχνολογία AI της Orca ολοκλήρωσε 40 ώρες πλοήγησης με περίπου 98% αυτονομία (O' Dwyer, 2023) (Maritime Executive, 2023) (Ship Technology, 2023).

Το Orca AI αντιπροσωπεύει ένα μείγμα προηγμένης τεχνολογίας και πρακτικής εφαρμογής στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Όχι μόνο ενισχύει την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα, αλλά συμβάλλει επίσης στις προσπάθειες βιωσιμότητας στη ναυτιλία. Αυτή η τεχνολογία αποτελεί ένα βήμα προς ένα μέλλον όπου οι θαλάσσιες δραστηριότητες είναι ασφαλέστερες, πιο αποτελεσματικές και περιβαλλοντικά υπεύθυνες.

## 5.8 Παρατηρήσεις – Σχολιασμός

Η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και της Μηχανικής Μάθησης (ML) στη ναυτιλιακή βιομηχανία παρουσιάζει δύο όψεις, φέρνοντας μεταμορφωτικά οφέλη αλλά και εισάγοντας μια σειρά από σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Από τη μία πλευρά, η αποτελεσματικότητα και η βελτιστοποίηση που επιφέρουν η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση είναι αναμφισβήτητη. Αυτές οι τεχνολογίες φέρνουν επανάσταση στις ναυτιλιακές λειτουργίες, προσφέροντας βελτιωμένο σχεδιασμό δρομολογίων, προγνωστική συντήρηση και λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων. Η ικανότητα ανάλυσης τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων για τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων αλλάζει τον τρόπο δράσης του κλάδου, επιτρέποντας άνευ προηγουμένου λειτουργική αποτελεσματικότητα και οικονομική αποδοτικότητα.

Ωστόσο, οι προκλήσεις και τα προβλήματα αυτής της τεχνολογικής επανάστασης είναι σημαντικά και δεν μπορούν να μην εκτιμηθούν. Το ζήτημα της ποιότητας και της ολοκλήρωσης των δεδομένων είναι όπως προέκυψε από την ανάλυση μας ένα μεγάλο

εμπόδιο. Χωρίς υψηλής ποιότητας ενσωματωμένα δεδομένα, οι αποφάσεις που λαμβάνονται από συστήματα τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να είναι θεμελιωδώς εσφαλμένες, οδηγώντας ακόμα και σε καταστροφικές συνέπειες. Αυτή η πρόκληση δεν είναι μόνο τεχνική αλλά και οργανωτική, καθώς απαιτεί ένα επίπεδο ανταλλαγής δεδομένων και συνεργασίας που η ναυτιλιακή βιομηχανία δεν έχει παραδοσιακά αναπτύξει.

Ο αντίκτυπος στην απασχόληση λόγω της αυτοματοποίησης και των διαδικασιών που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη είναι μια βαθιά κοινωνική ανησυχία. Η πιθανότητα σημαντικής μετατόπισης θέσεων εργασίας είναι μεγάλη και ο κλάδος έχει ευθύνη για τη διαχείριση αυτής της μετάβασης, εστιάζοντας στην επανεκπαίδευση και την αναβάθμιση του εργατικού δυναμικού, καθώς δεν είναι απλώς οικονομικό αλλά κυρίως ηθικό το ζήτημα.

Η απώλεια της αίσθησης ασφάλειας στον κυβερνοχώρο σε μια όλο και πιο ψηφιοποιημένη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι ένας πιθανός κίνδυνος. Η εξάρτηση από τις ψηφιακές τεχνολογίες ανοίγει τρωτά σημεία σε κυβερνοεπιθέσεις, οι οποίες μπορεί να έχουν συνέπειες, όχι μόνο για μεμονωμένες εταιρείες αλλά και για την παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού.

Οι ηθικοί προβληματισμοί στην εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης είναι ένα άλλο κρίσιμο ζήτημα. Η πιθανότητα μεροληψίας στους αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης και η έλλειψη διαφάνειας στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων μπορεί να οδηγήσει σε αθέμιτες και ανασφαλείς πρακτικές. Ο αργός ρυθμός της βιομηχανίας στην ανάπτυξη διαφανών και κατανοητών συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης αποτελεί σημαντική ανησυχία και εφιστά προσοχή.

Τα κενά ρυθμίσεων και τυποποίησης αποτελούν σημαντική πρόκληση. Η έλλειψη ολοκληρωμένων ρυθμιστικών πλαισίων και βιομηχανικών προτύπων για την τεχνητή νοημοσύνη στη ναυτιλία είναι πραγματικότητα σήμερα, που οδηγεί σε πιθανά ζητήματα ασφάλειας, νομικές επιπλοκές και ασυνεπείς πρακτικές σε όλο τον κόσμο.

Οι διαφορετικές οικονομικές δυνατότητες και προσβασιμότητες που διαμορφώνονται από το υψηλό κόστος εφαρμογής της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης δημιουργούν άνισους όρους ανταγωνισμού στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αυτό δεν επηρεάζει μόνο τον ανταγωνισμό εντός της αγοράς του κλάδου, αλλά έχει επίσης ευρύτερες επιπτώσεις στη δυναμική του παγκόσμιου εμπορίου.

Τέλος, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης για την αξιολόγηση κινδύνου, αν και πολλά υποσχόμενη, αναδεικνύει παράλληλα ανησυχίες σχετικά με την αξιοπιστία. Η πολυπλοκότητα και το απρόβλεπτο του θαλάσσιου περιβάλλοντος καθιστούν

αμφισβητήσιμη την ακρίβεια αυτών των προγνωστικών μοντέλων, οδηγώντας ενδεχομένως σε λανθασμένες αποφάσεις με σοβαρές επιπτώσεις.

Συμπερασματικά, ενώ τα πλεονεκτήματα των τεχνολογιών AI και ML είναι ξεκάθαρα, οι προκλήσεις που συνεπάγονται πρέπει να ληφθούν υπόψη. Είναι επιτακτική ανάγκη για τον κλάδο να υιοθετήσει μια πιο προσεκτική και στοχαστική προσέγγιση, δίνοντας προτεραιότητα στην ακεραιότητα των δεδομένων, σε ηθικά ζητήματα, στην ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, στην προσαρμογή του εργατικού δυναμικού και στη δίκαιη πρόσβαση. Αυτή η τεχνολογική εξέλιξη πρέπει να αντιμετωπιστεί με βαθύ αίσθημα ευθύνης και δέσμευση όχι μόνο για οικονομική αποδοτικότητα αλλά κοινωνική και ηθική υπευθυνότητα. Η πορεία προς την εξέλιξη αυτή θα πρέπει να είναι ισορροπημένη, όπου τα οφέλη της θα αξιοποιούνται με υπευθυνότητα και οι πιθανοί κίνδυνοι θα μετριάζονται με προνοητικότητα και επιμέλεια.

Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτενή ανάλυση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τα συμπεράσματα ταξινομούνται με βάση τη δομή της εργασίας.

#### 6.1 Εναλλακτικά Καύσιμα

##### 6.1.1 LNG

Το LNG εκπέμπει περίπου 25% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τα συμβατικά καύσιμα πλοίων για την ίδια ποσότητα ισχύος πρόωσης. Ωστόσο, το LNG είναι ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου (περιέχει πολύ υψηλές περιεκτικότητες μεθανίου). Αυτό εγείρει ανησυχίες σχετικά με τη διαρροή μεθανίου (slip methane) κατά τη διάρκεια του πλήρους κύκλου ζωής του, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης, της επεξεργασίας, της μεταφοράς και της καύσης.

Οι μελέτες υπογραμμίζουν τη σημασία της εξέτασης των εκπομπών πλήρους κύκλου ζωής του LNG, συμπεριλαμβανομένης και της διαρροής μεθανίου. Ορισμένα ευρήματα υποδεικνύουν ότι όταν υπολογίζονται υψηλότερα ποσοστά διαρροής, μπορεί να μην υπάρχει κανένα όφελος από τη χρήση LNG σε σύγκριση με άλλα καύσιμα, όπως το βαρύ μαζούτ, το μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο ή το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης πλοίων. Η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει επενδύσει στοχευμένα στην προσαρμογή των πλοίων στη χρήση LNG, θεωρώντας αυτό ως καύσιμο γέφυρα προς πιο βιώσιμες επιλογές όπως η μεθανόλη, η αμμωνία ή το υδρογόνο. Ωστόσο, υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με τη ρύθμιση του LNG στο πλαίσιο μελλοντικών περιβαλλοντικών πολιτικών, επηρεάζοντας ίσως την εμπιστοσύνη του κλάδου προς αυτήν την επένδυση.

Παρότι το LNG θεωρείται ως μια πρακτική μεταβατική λύση με την υπάρχουσα τεχνολογική και επιχειρησιακή υποδομή, ζητήματα όπως η ολίσθηση μεθανίου και οι ανεξέλεγκτες εκπομπές προκαλούν ανησυχίες. Νέες τεχνολογίες κινητήρων εμφανίζονται για τη μείωση αυτών των εκπομπών.

Οι μελλοντικές επενδύσεις στο LNG θα πρέπει να σταθμιστούν έναντι των αναδυόμενων τεχνολογιών και καυσίμων, με έμφαση στις συνολικές εκπομπές του κύκλου ζωής. Η αποτελεσματική απαλλαγή από τον άνθρακα των θαλάσσιων μεταφορών απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις τεχνολογικές εξελίξεις όσο και τα ρυθμιστικά πλαίσια.

### 6.1.2 Μεθανόλη

Η μεθανόλη, είναι γνωστή για την ευκολία χειρισμού της λόγω του ότι είναι υγρή σε συνθήκες περιβάλλοντος. Προσφέρει ένα σημαντικό βήμα προόδου στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία όταν εφαρμόζεται ως καύσιμο σε πλοία. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθανόλης έγκειται στη δυνατότητά της να μειώνει σημαντικά τα οξείδια του θείου, τα οξείδια του αζώτου και τις εκπομπές σωματιδίων σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων. Ωστόσο, όσον αφορά τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, ο αντίκτυπος της «παραδοσιακής» μεθανόλης είναι κάπως περιορισμένος. Η μεθανόλη παράγεται συμβατικά κυρίως από φυσικό αέριο και παρέχει μόνο 10-15% μείωση των εκπομπών GHG του κύκλου ζωής σε σύγκριση με τα βαρέα καύσιμα πλοίων.

Η e-μεθανόλη, που παράγεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και με δέσμευση του CO<sub>2</sub> κατά τη παραγωγή, ξεχωρίζει για τις δυνατότητές της να μειώσει δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Αυτή η παραλλαγή της διαδικασίας παραγωγής της μεθανόλης μπορεί να προσφέρει έως και 90% μείωση των εκπομπών GHG σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα πλοίων, ευθυγραμμίζοντας τη διαδικασία με τους στόχους του IMO. Ένας καθοριστικός παράγοντας για τη βιωσιμότητα της e-μεθανόλης είναι το προφίλ εκπομπών της, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την παραγωγή όσο και τις εκπομπές καύσης. Συγκεκριμένα, η χρήση αιολικής ενέργειας για την παραγωγή e-μεθανόλης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση κατά 94% των εκπομπών, καθιστώντας την μια εξαιρετικά βιώσιμη επιλογή.

Η υιοθέτηση της e-μεθανόλης σε μεγάλα πλοία αποτελεί πρόκληση λόγω της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας. Απαιτείται σημαντικός επανασχεδιασμός των πλοίων, ειδικά όσον αφορά την ικανότητα αποθήκευσης καυσίμων. Η παγκόσμια ικανότητα παραγωγής μεθανόλης υπερβαίνει επί του παρόντος τους 100 εκατομμύρια τόνους, με ένα μικρό μέρος να είναι πράσινη. Το κόστος της μεθανόλης κυμαίνεται μεταξύ 180-580 ευρώ ανά μετρικό τόνο, το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας για την υιοθέτησή της στη ναυτιλία.

Από κανονιστικής σκοπιάς, οι κανόνες του IMO παρέχουν ένα πλαίσιο ασφαλείας για καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης όπως η μεθανόλη. Ειδικά ζητήματα για τη μεθανόλη περιλαμβάνουν πρόσθετους ανιχνευτές λόγω των βαρύτερων από τον αέρα ατμών και της τοξικότητάς της. Η υιοθέτηση των ενδιάμεσων κατευθυντήριων γραμμών του IMO για την ασφάλεια των πλοίων που χρησιμοποιούν μεθανόλη ως καύσιμο υπογραμμίζει περαιτέρω τη ρυθμιστική πρόοδο σε αυτόν τον τομέα.

Η μεθανόλη και η e-μεθανόλη διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο σε αυτή τη μετάβαση προς μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία. Μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες

όπως η Maersk προσανατολίζονται ήδη προς τη χρήση πράσινης μεθανόλης στο στόλο τους έως το 2030.

### 6.1.3 Υδρογόνο

Ο ρόλος του υδρογόνου στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία είναι σημαντικός, κυρίως του πράσινου υδρογόνου. Σε αντίθεση με το γκρι υδρογόνο, το οποίο παράγεται από ορυκτά καύσιμα και εκπέμπει σημαντικά CO<sub>2</sub>, αλλά και το μπλε υδρογόνο, το οποίο μειώνει τις εκπομπές μέσω της δέσμευσης άνθρακα, το πράσινο υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με αποτέλεσμα να σημειώνει ελάχιστες εκπομπές.

Δεδομένου ότι το γκρι υδρογόνο κυριαρχεί επί του παρόντος στην παραγωγή, αλλά έχει μεγάλο αποτύπωμα άνθρακα, η στροφή προς το πράσινο υδρογόνο είναι κρίσιμη για αισθητά περιβαλλοντικά οφέλη. Αυτή η μετάβαση είναι σύμφωνη με τις παγκόσμιες δεσμεύσεις για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη των στόχων της Συμφωνίας του Παρισιού.

Στρατηγικές συνεργασίες και δεσμεύσεις, όπως η συμφωνία για την αύξηση της παραγωγής πράσινου υδρογόνου σε 5.5 εκατομμύρια τόνους ετησίως έως το 2030, ειδικά για τη ναυτιλία, υπογραμμίζουν την αφοσίωση της βιομηχανίας στην ενσωμάτωση του υδρογόνου στο μείγμα καυσίμων της. Αυτό το επίπεδο παραγωγής είναι σχεδόν το 90% του πράσινου υδρογόνου που χρειάζεται ο ναυτιλιακός τομέας σε αυτό το χρονικό πλαίσιο.

Ένα από τα κύρια εμπόδια στην υιοθέτηση του υδρογόνου στη ναυτιλία είναι η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών για την αποθήκευση και τον ανεφοδιασμό του. Η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου απαιτεί συγκεκριμένο χειρισμό, συμπεριλαμβανομένης της συμπίεσης και της ψύξης, γεγονός που απαιτεί σημαντική ανάπτυξη υποδομής.

Η απουσία λεπτομερούς ρυθμιστικού πλαισίου για πλοία με υδρογόνο περιπλέκει την ευρύτερη υιοθέτησή του. Η δημιουργία κανονισμών είναι το κλειδί για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της τυποποίησης σε ολόκληρο τον κλάδο.

## 6.2 Υλικά και Σχεδιασμός

Με βάση την ανάλυση της παρούσας εργασίας στο τομέα των υλικών και του σχεδιασμού πλοίων με ειδικευση στις τεχνολογίες που αφορούν το μέγεθος σκάφους, την επιστροφή κύτους, το σχήμα κύτους και χρήση ελαφρών υλικών, παρακάτω παραθέτουμε τα βασικά συμπεράσματα και τις κρίσιμες παρατηρήσεις ανά περίπτωση.

### 6.2.1 Μέγεθος σκάφους

Η έννοια των «οικονομικών κλίμακας» είναι καθοριστικής σημασίας για την κατανόηση της αποτελεσματικότητας των μεγαλύτερων σκαφών. Τα μεγαλύτερα πλοία, ιδιαίτερα στις κατηγορίες χύδην και εμπορευματοκιβωτίων, έχουν σχεδιαστεί για να μεταφέρουν περισσότερο φορτίο με σχετικά λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Αυτή η αύξηση της κλίμακας έχει συνδεθεί με τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τόνο μίλι. Ωστόσο, οι συνολικές εκπομπές από αυτά τα μεγαλύτερα πλοία μπορεί να είναι σημαντικές λόγω της συνολικής χωρητικότητας και της κατανάλωσης καυσίμου.

Η τάση προς μεγαλύτερα πλοία πρέπει να αντιμετωπιστεί προσεκτικά. Θα πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο την εξέταση της αποδοτικότητας των καυσίμων, αλλά και τις επιπτώσεις για τις λιμενικές υποδομές, οι οποίες ενδέχεται να χρειάζονται ουσιαστικές τροποποιήσεις για να φιλοξενήσουν αυτά τα μέγα-πλοία. Επιπλέον, τα μεγαλύτερα πλοία μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη ρύπανση των υδάτων και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε συγκεντρωμένες περιοχές, όπως τα μεγάλα λιμάνια, απαιτώντας μια ευρύτερη εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

### 6.2.2 Επικάλυψη γάστρας

Οι πρόσφατες εξελίξεις στις επικαλύψεις κύτους, όπως η ανάπτυξη επικαλύψεων με βάση τη σιλικόνη και άλλων μη τοξικών επικαλύψεων, έχουν αποδειχθεί πολλά υποσχόμενες τεχνικές για τη μείωση της αντίστασης του κύτους και, κατά συνέπεια, της κατανάλωσης καυσίμου. Αυτές οι επικαλύψεις λειτουργούν ελαχιστοποιώντας τη θαλάσσια βιο-ανάπτυξη (βιορρύπανση) στη γάστρα, η οποία μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντίσταση. Μελέτες δείχνουν ότι οι αποτελεσματικές επικαλύψεις κύτους μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου έως και 5-10%, επηρεάζοντας άμεσα τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ο προσανατολισμός σε πιο φιλικές προς το περιβάλλον επιστρώσεις κύτους είναι περίπλοκος. Η βιομηχανία αντιμετωπίζει προκλήσεις όσον αφορά την εξισορρόπηση της αποτελεσματικότητας, της ανθεκτικότητας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η υιοθέτηση νέων επιστρώσεων εκτός από τεχνολογικό ζήτημα είναι κανονιστικό και οικονομικό. Απαιτεί δηλαδή, σαφείς κανονισμούς και πιθανώς κίνητρα για την ενθάρρυνση επενδύσεων σε αυτές τις πιο ακριβές, αλλά φιλικές προς το περιβάλλον, επιλογές.

### 6.2.3 Σχήμα γάστρας

Η βελτιστοποίηση του σχήματος της γάστρας, με γνώμονα την προηγμένη υπολογιστική μοντελοποίηση και δοκιμές, έχει οδηγήσει σε σχέδια που μειώνουν σημαντικά την υδροδυναμική αντίσταση. Αυτές οι καινοτομίες δεν περιορίζονται στην εξωτερική σχεδίαση της γάστρας, αλλά περιλαμβάνουν επίσης το βολβώδες τόξο και το σχέδιο της πρύμνης, που συμβάλλουν στη συνολική απόδοση. Τέτοιες σχεδιαστικές βελτιώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων, ειδικά σε μεγάλα ταξίδια που χαρακτηρίζουν την εμπορική ναυτιλία.

Η πρόκληση έγκειται στη μετασκευή των υπαρχόντων σκαφών και στο κόστος που σχετίζεται με την ενσωμάτωση αυτών των σχεδίων σε νέες κατασκευές. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση του σχήματος του κύτους πρέπει να προσαρμόζεται σε συγκεκριμένα λειτουργικά προφίλ, καθώς μια σχεδίαση ιδανική για μία διαδρομή ή ταχύτητα μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματική υπό διαφορετικές συνθήκες. Αυτό απαιτεί μια πιο δυναμική προσέγγιση στο σχεδιασμό του κύτους, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα επιχειρησιακά σενάρια.

### 6.2.4 Ελαφριά Υλικά

Η εισαγωγή ελαφρών υλικών όπως τα προηγμένα σύνθετα υλικά και ο χάλυβας υψηλής αντοχής έχει συμβάλει καθοριστικά στη μείωση του συνολικού βάρους των πλοίων. Αυτή η μείωση βάρους μεταφράζεται άμεσα σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου για την πρόωση και, κατά συνέπεια, σε μειωμένες εκπομπές ρύπων. Η χρήση αυτών των υλικών δεν αφορά μόνο στη δομή των πλοίων αλλά και σε διάφορα εξαρτήματα, με αποτέλεσμα τη συνολική μείωση του βάρους.

Η υιοθέτηση ελαφρών υλικών συνοδεύεται και από προκλήσεις. Αυτά τα υλικά συχνά εμφανίζουν υψηλότερο κόστος και ερωτήματα σχετικά με τη μακροπρόθεσμη αντοχή και τη συντήρησή τους. Επιπλέον, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής και, τελικά, της ανακύκλωσης ή της απόρριψης αυτών των υλικών πρέπει να ληφθούν υπόψη. Είναι σημαντικό να αξιολογηθεί ολόκληρος ο κύκλος ζωής αυτών των υλικών για να διασφαλιστεί ότι η χρήση τους δεν θα οδηγήσει ακούσια σε αυξημένη περιβαλλοντική επίπτωση.



## 6.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

### 6.3.1 Ηλιακή ενέργεια

Η εφαρμογή ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλιακή βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων και των θαλάσσιων υποδομών, όπως λιμάνια και υπεράκτιες πλατφόρμες, έχει σημαντικές δυνατότητες για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αυτή η μείωση επιτυγχάνεται με την άμεση ελάττωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων για λειτουργίες πλοίων και βοηθητικές λειτουργίες. Η ενσωμάτωση ηλιακών συλλεκτών σε πλοία και λιμάνια συμβάλλει σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μείγμα, φέρνοντας τον ναυτιλιακό τομέα πιο κοντά στους στόχους του για απεξάρτηση από ορυκτά καύσιμα.

Μία από τις κύριες προκλήσεις με την ηλιακή ενέργεια στις εφαρμογές σε πλοία είναι η διαλείπουσα φύση της, καθώς η παραγωγή ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η έλλειψη διαθέσιμου χώρου στα πλοία περιορίζει τον αριθμό των ηλιακών συλλεκτών που μπορούν να εγκατασταθούν, επηρεάζοντας έτσι τη συνολική ενέργεια που μπορεί να συλλεχθεί. Αυτοί οι παράγοντες απαιτούν την ανάγκη για ισχυρές λύσεις αποθήκευσης ενέργειας και μια υβριδική προσέγγιση, που συνδυάζει την ηλιακή ενέργεια με άλλες πηγές για τη διασφάλιση σταθερού και αξιόπιστου ενεργειακού εφοδιασμού.

Το σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί μία πρόσθετη σημαντική πρόκληση για την ανθεκτικότητα των ηλιακών συλλεκτών. Η διάβρωση, οι φθορές στο αλμυρό νερό και οι ακραίες καιρικές συνθήκες είναι μερικοί από τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα και τη διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων στους στόλους όσο και στην υπάρχουσα θαλάσσια υποδομή απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και μηχανική καινοτομία, διασφαλίζοντας ότι δεν επηρεάζονται οι επιχειρησιακές δυνατότητες ή η ασφάλεια των πλοίων.

Παρά τα περιβαλλοντικά οφέλη, η οικονομική πτυχή της ενσωμάτωσης της ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλία δεν μπορεί να παραλειφθεί. Η αρχική επένδυση για την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών και συναφών υποδομών είναι σημαντική. Επιπλέον, η απόδοση της επένδυσης επηρεάζεται από παράγοντες όπως η απόδοση των ηλιακών συλλεκτών, το κόστος της συντήρησής τους και η εξοικονόμηση ενέργειας από τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου. Τα οικονομικά κίνητρα και η ρυθμιστική υποστήριξη είναι εξέχουσας βαρύτητας για να καταστεί η ηλιακή ενέργεια πιο οικονομικά βιώσιμη επιλογή για τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων. Η ύπαρξη αποτελεσματικών πολιτικών και κανονιστικών πλαισίων θα καθορίσουν την προώθηση της υιοθέτησης ηλιακής ενέργειας στον ναυτιλιακό τομέα. Αυτά τα πλαίσια όχι

μόνο θα πρέπει να παρέχουν οικονομικά κίνητρα, αλλά και να θέτουν πρότυπα για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας, την ασφάλεια και την περιβαλλοντική συμμόρφωση.

Το μέλλον της ηλιακής ενέργειας στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι εγγενώς συνδεδεμένο με τις συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις, την οικονομική αξιολόγηση και τη ρυθμιστική υποστήριξη. Καθώς ο ναυτιλιακός τομέας συνεχίζει να εξελίσσεται και να περιλαμβάνει ολοένα και περισσότερο τη βιωσιμότητα, η ηλιακή ενέργεια ξεχωρίζει ως υποσχόμενος συντελεστής στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η συνεχής έρευνα, η καινοτομία και η συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών της βιομηχανίας, των κυβερνήσεων και των περιβαλλοντικών οργανώσεων είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση των τρεχουσών προκλήσεων και την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της ηλιακής ενέργειας στις ναυτιλιακές εφαρμογές.

### 6.3.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ως βασικός παράγοντας για την απαλλαγή από τις εκπομπές GHG της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Η μετάβαση προς την υποβοηθούμενη από τον αέρα πρόωση πλοίων (WASP) και η χρήση ανεμογεννητριών σε πλοία είναι παραδείγματα του τρόπου με τον οποίο η αιολική ενέργεια μπορεί να συμπληρώσει τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η ναυτιλιακή βιομηχανία διερευνά καινοτόμες εφαρμογές αιολικής ενέργειας, όπως υπεράκτια αιολικά πάρκα, που θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως πρακτικοί σταθμοί ανεφοδιασμού στη θάλασσα, παρέχοντας καθαρή ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να χρειάζεται να ελλιμενίζονται τα πλοία. Αυτή η πρόοδος όχι μόνο ελαχιστοποιεί τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αλλά βελτιώνει επίσης την ποιότητα του αέρα των λιμένων.

Η εφαρμογή της αιολικής ενέργειας στη ναυτιλία αντιμετωπίζει πολλές τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση στροβίλων ή πανιών σε μεγαλύτερα σκάφη απαιτεί την προσεκτική εξέταση της σταθερότητας πλευσης, του χώρου που καταλαμβάνουν και του ελέγχου ασφαλείας κατά τη πλευση.

Το αρχικό κόστος επένδυσης και συντήρησης των συστημάτων αιολικής ενέργειας συνιστά σημαντική παράμετρο και εντάσσεται στο πλαίσιο των οικονομικών προκλήσεων των τεχνολογιών αυτών. Ενώ η αιολική ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση καυσίμων και μειωμένο λειτουργικό κόστος, η αρχική επένδυση και οι πιθανές τροποποιήσεις στα σχέδια των πλοίων επιβάλλεται να συνυπολογιστούν. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα

των συστημάτων αιολικής ενέργειας εξαρτάται από την απόδοσή τους, την κλίμακα εφαρμογής και τις συνθήκες που επικρατούν στην αγορά.

Η πλήρης μετάβαση σε στόλους που κινούνται με αιολική ενέργεια είναι μια μακροπρόθεσμη ενέργεια που απαιτεί σημαντικό χρόνο και προσπάθεια. Η τρέχουσα προσοχή είναι στην ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας ως συμπληρωματικής πηγής ενέργειας και όχι ως μοναδικού μέσου πρόωσης. Αυτή η στρατηγική σταδιακής ολοκλήρωσης επιτρέπει μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση για την υιοθέτηση της αιολικής ενέργειας, αντιμετωπίζοντας παράλληλα τις διάφορες προκλήσεις και περιορισμούς.

### 6.3.3 Κυψέλες καυσίμου

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου στη ναυτιλία μπορεί να μειώσει σημαντικά το λειτουργικό κόστος οδηγώντας παράλληλα σε σημαντική μείωση των αερίων θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, οι κυψέλες καυσίμου φυσικού αερίου μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> και τα SO<sub>x</sub> κατά περισσότερο από 99% σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες. Αυτή η σημαντική μείωση των εκπομπών ευθυγραμμίζεται απόλυτα με την απαίτηση του κλάδου προς πιο πράσινες και βιώσιμες λειτουργίες.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου είναι η ευελιξία της. Η τεχνολογία επιτρέπει τη χρήση διαφορετικών τύπων καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του LNG και άλλων υποσχόμενων με μελλοντικά μηδενικές εκπομπές. Αυτή η ευελιξία εξασφαλίζει περιβαλλοντικά αποδοτική λειτουργία ανεξάρτητα από τις αλλαγές στους τύπους καυσίμων, καθιστώντας τη μια αξιόλογη λύση για τη ναυτιλιακή βιομηχανία της επόμενης ημέρας. Οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν μια βιώσιμη διαδρομή για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας μακροπρόθεσμα.

Η διαδικασία αξιολόγησης των κυψελών καυσίμου πλοίων πρέπει να είναι αυστηρή, απαιτώντας τεχνολογίες που θα αντέχουν σε διάφορα σενάρια λειτουργίας και στις σκληρές συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η διασφάλιση της ασφάλειας, της ανθεκτικότητας και της αποτελεσματικότητας είναι μια κρίσιμη πτυχή της ενσωμάτωσης κυψελών καυσίμου σε ναυτιλιακές εφαρμογές. Η ανάπτυξη μιας ισχυρής υποδομής τροφοδοσίας για πράσινα καύσιμα όπως η αμμωνία και το υδρογόνο είναι μια ενδιαφέρουσα πρόκληση. Μολονότι η τεχνολογία εξελίσσεται προς αυτή τη κατεύθυνση, η παγκόσμια υποδομή για αυτά τα καύσιμα βρίσκεται ακόμη σε ανάπτυξη, γεγονός που μπορεί να καθυστερήσει την καθολική αποδοχή των κυψελών καυσίμου στη ναυτιλία.

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου μπορεί μετέπειτα να επηρεάσει το μέλλον του σχεδιασμού των πλοίων. Σε αντίθεση με τα συμβατικά πλοία, οι κυψέλες καυσίμου

επιτρέπουν πιο ευέλικτο και αποδοτικό σχεδιασμό γάστρας και διευρυμένο χώρο φόρτωσης. Ωστόσο, η μετασκευή υπάρχοντων σκαφών με τεχνολογία κυψελών καυσίμου δεν είναι απλή περιορίζοντας την εφαρμογή της τεχνολογίας.

Η οικονομική πτυχή της εφαρμογής της στη ναυτιλία είναι βασικός παράγοντας. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους μακροπρόθεσμα, όμως η αρχική επένδυση και το πιθανό κόστος μετασκευής είναι υπολογίσιμα. Η εξισορρόπηση αυτή του αρχικού κόστους με τα μακροπρόθεσμα οφέλη είναι ζωτικής σημασίας για τους πλοιοκτήτες όταν εξετάζουν την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας.

Το μέλλον της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου στη ναυτιλιακή βιομηχανία παρουσιάζει μια πολλά υποσχόμενη οδό για σημαντικές μειώσεις εκπομπών και λειτουργική απόδοση. Ωστόσο, η αντιμετώπιση των προκλήσεων της αξιολόγησης, της ασφάλειας, της ανάπτυξης υποδομών και της οικονομικής βιωσιμότητας είναι απαραίτητη για την ευρεία υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη, σε συνδυασμό με υποστηρικτικές πολιτικές και τη βιομηχανική συνεργασία, είναι το κλειδί για την υπέρβαση αυτών των προκλήσεων και την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των κυψελών καυσίμου.

## 6.4 Εφαρμογές AI και ML

Μετά από εκτενή ανασκόπηση της πρόσφατης βιβλιογραφίας και έρευνας σχετικά με την εφαρμογή των τεχνολογιών AI και ML στον ναυτιλιακό τομέα, ειδικά για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG), παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα και η σχετική κριτική αξιολόγηση.

Βασικά συμπεράσματα:

- Δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου στη ναυτιλία: Οι τεχνολογίες AI και ML προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον ναυτιλιακό τομέα. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της βελτιστοποίησης της διαδρομής, που οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμου με αποτέλεσμα τις χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
- Βελτιώσεις στις λιμενικές λειτουργίες: Η ψηφιοποίηση των λιμένων με γνώμονα την τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικές λειτουργίες λιμένων. Καινοτομίες όπως ο ακριβής εκτιμώμενος χρόνος αφίξεων και η διαχείριση της κυκλοφορίας με βάση την τεχνητή νοημοσύνη στα λιμάνια συμβάλλουν σε μειωμένους χρόνους παραμονής και χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>.

- Βελτιώσεις συντήρησης και ασφάλειας: Η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την προγνωστική συντήρηση των πλοίων και των λιμενικών εγκαταστάσεων, μειώνοντας τους χρόνους επισκευής και τις διακοπές λειτουργίας. Ενισχύει επίσης την ασφάλεια παρέχοντας καλύτερα δεδομένα για τη λήψη αποφάσεων και την αυτοματοποίηση επικίνδυνων εργασιών.
- Προκλήσεις στην ενοποίηση και την ποιότητα των δεδομένων: Ένα από τα κύρια εμπόδια για την πλήρη εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης σε αυτόν τον τομέα είναι η ποιότητα και η ενοποίηση των δεδομένων. Η διασφάλιση υψηλής ποιότητας, αξιόπιστων δεδομένων σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική ανάπτυξη και εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης.
- Οικονομικά και Περιβαλλοντικά Οφέλη: Οι τεχνολογίες AI και ML στον ναυτιλιακό τομέα υπόσχονται όχι μόνο περιβαλλοντικά οφέλη αλλά και οικονομικά. Μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση κόστους, καλύτερη διαχείριση κινδύνου και πιο αποτελεσματικές λειτουργίες.

#### Κριτική Αξιολόγηση:

- Η τεχνητή νοημοσύνη ως συμπληρωματικό εργαλείο: Ενώ η τεχνητή νοημοσύνη υπόσχεται πολλά, θα πρέπει να θεωρείται ως εργαλείο που συμπληρώνει άλλες στρατηγικές για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και όχι ως μια αυτόνομη λύση. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από την ποιότητα των υποκείμενων δεδομένων και την ενσωμάτωση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης σε υπάρχουσες θαλάσσιες υποδομές.
- Εμπόδια στην υιοθέτηση: Τα σημαντικά εμπόδια στην υιοθέτηση της τεχνητής νοημοσύνης στον ναυτιλιακό τομέα περιλαμβάνουν προκλήσεις ενοποίησης δεδομένων, ζητήματα εμπιστοσύνης, περιορισμούς πόρων και ρυθμιστικά εμπόδια. Η υπέρβαση αυτών των εμποδίων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή ανάπτυξη τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης.
- Ανάγκη για συνεργατικές προσπάθειες: Η αντιμετώπιση των προκλήσεων της εφαρμογής τεχνητής νοημοσύνης στη ναυτιλία απαιτεί συλλογικές προσπάθειες από πολλούς ενδιαφερόμενους φορείς, συμπεριλαμβανομένων ναυτιλιακών εταιρειών, λιμενικών αρχών, παρόχων τεχνολογίας και ρυθμιστικών φορέων. Η συλλογική δράση είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη και την τυποποίηση αποτελεσματικών λύσεων που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη.

- Κυβερνοασφάλεια και θέσεις εργασίας: Η αυξανόμενη εξάρτηση από τις ψηφιακές τεχνολογίες και την τεχνητή νοημοσύνη εγείρει ανησυχίες για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο. Επιπλέον, υπάρχει φόβος για μετατόπιση εργασίας λόγω του αυτοματισμού που επιτάσσουν αυτές οι τεχνολογίες. Η αντιμετώπιση αυτών των ανησυχιών μέσω αυστηρών μέτρων ασφαλείας και επανεκπαίδευσης του εργατικού δυναμικού είναι ζωτικής σημασίας.
- Ηθικές και κοινωνικές επιπτώσεις: Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης στη ναυτιλία θέτει επίσης ηθικές και κοινωνικές προκλήσεις. Υπάρχει ανάγκη για υπεύθυνη χρήση τεχνητής νοημοσύνης, διασφάλιση διαφάνειας, λογοδοσίας και δικαιοσύνης στις αποφάσεις που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη.
- Παγκόσμια ανισότητα στην πρόσβαση και την εφαρμογή: Υπάρχει μια αξιοσημείωτη διαφορά στην εφαρμογή και την πρόσβαση στην τεχνολογία AI μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών. Αυτή η ανισότητα θα μπορούσε να επιφέρει προκλήσεις στον παγκόσμιο ναυτιλιακό κλάδο.
- Μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα: Ενώ η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να συμβάλει σε βραχυπρόθεσμες μειώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητά της εξαρτάται από τη συνεχή καινοτομία, τη ρυθμιστική υποστήριξη και την ευθυγράμμιση με ευρύτερους κλιματικούς στόχους. Η βιομηχανία θα πρέπει να βλέπει την τεχνητή νοημοσύνη ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής που περιλαμβάνει την υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, βελτιωμένο σχεδιασμό πλοίων και άλλες τεχνολογικές προόδους.

## Αναφορές

**Abnett, Kate. 2022.** EU strikes deal to make ships pay for their carbon emissions. *REUTERS*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.reuters.com/business/cop/eu-strikes-deal-make-ships-pay-their-carbon-emissions-2022-11-30/>.

**ABS. 2021.** *ABS ADVISORY ON DECARBONIZATION APPLICATIONS FOR POWER GENERATION AND PROPULSION*. 2021.

**Ahmed, M. και Dincer, I. 2011.** A review on methanol crossover in direct methanol fuel cells: Challenges and achievements. *Int. J. Energy Res.* 2011, 35, σσ. 1213-1228.

**Ajdin, Adis. 2022.** SPLASH247. <https://splash247.com/cosco-orders-twelve-methanol-fuelled-24000-teu-ships/>. [Ηλεκτρονικό] 31 October 2022.

**Alam, Shafiqul, και συν. 2023.** Global LNG Outlook 2023-27. *Institute for Energy Economics and Financial Analysis*. 2023.

**American Petroleum Institute. 2015.** “Liquified Natural Gas (LNG) Operations: Consistent Methodology for Estimating Greenhouse Gas Emissions. 2015.

**Argus. 2022.** Methanol Prices, Forecasts and Analysis. *Argus Media*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.argusmedia.com/en/chemicals/argus-methanol-services>.

**Asariotis, R., & Benamara, H. 2016.** *Review of recent trends in ship scrapping*. UNCTAD Research Paper No. 32. 2016.

**AURORA. 2021.** *Hydrogen Market Attractiveness Report (HyMAR)*. 2021.

**BAUMULLER. 2022.** Hydrogen ship propulsion – the emission-free future of marine mobility. *BAUMULLER*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.baumueller.com/us/industries/shipbuilding/hydrogen-ship-propulsion>.

**Bengtsson, S. 2012.** *Criteria for future marine fuels*. The IAME 2012 Conference. Taipei : s.n., 2012.

**Bengtsson, S., Andersson, K. και Fridell, E. 2011.** *Lifecycle assessment of marine fuels: A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion*. Gothenburg : Chalmers University of Technology, 2011.

**Bernacki, Dariusz. 2021.** Assessing the Link between Vessel Size and Maritime Supply Chain Sustainable Performance. *energies*. 2021, 14.

**Blanton , Erin και Mosis, Samer. 2021.** The carbon-neutral LNG market: creating a framework for real emission reductions. *Columbia/Sipa*. Center on Global Energy Policy, 2021.

**Blanton, Erin και Mosis, Samer. 2021.** THE CARBON-NEUTRAL LNG MARKET: CREATING A FRAMEWORK FOR REAL EMISSIONS REDUCTIONS. *Columbia, Center on Global Energy Policy*. 2021.

**BloombergNEF. 2024.** Global LNG Winter Outlook 2023-24. *BloombergNEF*. [Ηλεκτρονικό] 2024. <https://about.bnef.com/blog/global-lng-winter-outlook-2023-24/>.

**Bo, Lu, και συν. 2023.** Challenges of decarbonizing global maritime container shipping toward net-zero emissions. *Ocean Sustainability*. 2023, 2.

- Bostan, I., και συν. 2013.** Resilient energy systems. *Netherland: Springer Verlag*; 2013.
- Brymolf, S., και συν. 2018.** Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, σσ. 1887-1905.
- Brymolf, S., Fridell, E. και Andersson, K. 2014.** Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of cleaner production*. 2014, σσ. 86-95.
- Bullock, S., Mason, J. και Larkin, A. 2022.** The urgent case for stronger climate targets for international shipping. *Clim Policy*. 2022, 22, σσ. 301-309.
- BUREAU VERITAS. 2022.** ALTERNATIVE FUELS OUTLOOK FOR SHIPPING: AN OVERVIEW OF ALTERNATIVE FUELS FROM A WELL-TO-WAKE PERSPECTIVE. 2022.
- ÇAĞLAYAN,, Muhammet Metin και MENTEŞ, Ayhan. 2020.** METALLIC MATERIALS USED IN SHIP CONSTRUCTION -FABRICATION TECHNIQUES, CLASSIFICATION AND CERTIFICATION. *Sayı 21,*. 2020.
- CameronLNG. 2023.** Natural Gas and Liquefaction Process. *CameronLNG*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://cameronlng.com/wp-content/uploads/2018/10/Natural-Gas-and-the-Liquefaction-Process-CLNG.pdf>.
- Cames, M., και συν. 2023.** Climate protection in aviation and maritime transport: Roadmaps for achieving the climate goals. *Umweltbundesam*. 2023.
- CE Delft & RH DHV. 2020.** Bio-Scope. Use and availability of sustainable biomass. *CEDELFT*. [Ηλεκτρονικό] 2020. [https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE\\_Delft\\_190186\\_Bio-Scope\\_Def.pdf](https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE_Delft_190186_Bio-Scope_Def.pdf).
- Chryssakis, C., Brinks, H. και King, T. 2015.** The fuel trilemma: Next generation of marine fuels, Strategic position paper 03-2015. *DNV GL Strategic research & innovation*. 2015.
- Coatings Pro. 2022.** Introduction of New Hull Coating Technology. *Coatings Pro*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.coatingspromag.com/industry-news/2021/03/introduction-of-new-hull-coating-technology>.
- Comer, Bryan και Liudmila, Osipova. 2021.** ACCOUNTING FOR WELL-TO-WAKE CARBON DIOXIDE EQUIVALENT EMISSIONS IN MARITIME TRANSPORTATION CLIMATE POLICIES. *The International Council On Clean Transportation*. 2021.
- Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting. 2012.** *Application of Lightweighting Technology to Military Aircraft, Vessels, and Vehicles*. Washington, DC : National Academies Press, 2012.
- Crupi, V. και Palomba, G. 2023.** Lightweight and Additively Manufactured Structures in Marine Application. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023.
- Defense Advancement. 2022.** US Navy Awards Technology Contract for Autonomous Hull Cleaning Robot. *Defense Advancement*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.defenseadvancement.com/news/us-navy-awards-technology-contract-for-autonomous-hull-cleaning-robot/>.



**DNV. 2023.** DNV – Alternative Fuels Insight Platform. *DNV*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://afi.dnv.com/>.

**DNV GL. 2021.** Maritime Forecast to 2050, Energy Transition Outlook 2021. *DNV*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/index.html>.

**DNV GL. 2023.** *Maritime Forecast to 2050*. 2023.

**DNV. 2021.** LNG as marine fuel. *DNV*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/index.html>.

—. **2022.** Maritime Forecast to 2050, Energy Transition Outlook 2022. *DNV*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2022/index.html>,

**Du, W., και συν. 2022.** Energy saving method for ship weather routing optimization. *Ocean Eng.* 2022, Τόμ. 258.

**EC - European Commission. 2021.** *Assessment of impacts from accelerating the uptake of sustainable alternative fuels in maritime transport*. s.l. : Final Report. CE Delft; Ecorys., 2021.

**Econnect. 2020.** HOW DOES AN LNG PLANT WORK? *Econnect*. [Ηλεκτρονικό] 2020. <https://www.econnectenergy.com/articles/how-does-an-lng-plant-work>.

**EMSA. 2023.** *Potential of Hydrogen as Fuel for Shipping*. s.l. : ABS, CE DELFT & ARCSILEA, 2023.

**Energy API. 2015.** *Consistent Methodology for Estimating Greenhouse Gas Emissions*. s.l. : LEVON Group LLC, 2015.

**Errard, A., Diaz-Alonso, F. και Goll, M. 2021.** EC.EUROPA. [Ηλεκτρονικό] 2021. [https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Electrical\\_capacity\\_for\\_wind\\_and\\_solar\\_photovoltaic\\_power\\_-\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Electrical_capacity_for_wind_and_solar_photovoltaic_power_-_statistics).

**European Commission. 2023.** FuelEU Maritime – Sustainable maritime fuels. *EuroParl*. [Ηλεκτρονικό] 2023. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/749810/EPRS\\_ATA\(2023\)749810\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/749810/EPRS_ATA(2023)749810_EN.pdf).

—. **2023.** Reducing emissions from the shipping sector. *Climate Action*. [Ηλεκτρονικό] 2023. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en).

**Fahnestock, J. και Bingham, C. 2021.** Mapping of zero emission pilot and demonstration projects, Insight brief prepared for the Getting to Zero Coalition (Second edition). *Global Maritime Forum*. 2021.

**Fastwater. 2021.** Report on methanol supply, bunkering guidelines, and infrastructure. [Ηλεκτρονικό] 2021. [https://www.fastwater.eu/images/fastwater/news/FASTWATER\\_D71.pdf](https://www.fastwater.eu/images/fastwater/news/FASTWATER_D71.pdf).

**Fortune Business Insights. 2021.** Marine Vessel Market Size . *Naval Marine & Ports Technologies*. [Ηλεκτρονικό] 2021. - <https://www.fortunebusinessinsights.com/marine-vessel-market-102699>.

**Frithiof, N. 2021.** Five lessons to learn on hydrogen as ship fuel. *DNV*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Five-lessons-to-learn-on-hydrogen-as-ship-fuel.htm>.

**Garrido, J., Sauri, S. και Marrero, A. 2020.** Predicting the Future Capacity and Dimensions of Container Ships. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2020.

**Gas Infrastructure Europe. 2018.** The benefits and role of LNG in Europe: Providing Europe's Energy Today. *GIE*. [Ηλεκτρονικό] 2018. [https://www.gie.eu/wp-content/uploads/filr/2734/GIE\\_Brochure\\_The\\_Benefits\\_and\\_Role\\_of\\_LNG\\_in\\_Europe\\_January2018.pdf](https://www.gie.eu/wp-content/uploads/filr/2734/GIE_Brochure_The_Benefits_and_Role_of_LNG_in_Europe_January2018.pdf).

**Gibbins, J. και Chalmers, H. 2008.** Carbon capture and storage. *Energy Police*. 2008, 36, σσ. 4317-4322.

**Gilligan, Brian Kenneth. 2019.** *Electric ship digital twin : framework for cyber-physical system security*. s.l. : MIT, 2019.

**Goeppert, A., και συν. 2014.** Recycling of carbon dioxide to methanol and derived products - closing the loop. *Chemical Society reviews*. 2014, Τόμ. 43, 23, σσ. 7995-8048.

**Grahn, M. 2021.** Review of the feasibility of electrofuels in the transport sector - Cost and environmental impact. *Manuscript draft submitted for review*. 2021.

**Graphene-info. 2023.** Stolt Tankers applies graphene coating technology to the hull of a chemical tanker. *The Graphene experts*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.graphene-info.com/stolt-tankers-applies-graphene-coating-technology-hull-chemical-tanker>.

**Greensea IQ. 2023.** Robotic Revolution. *Greensea IQ*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://greenseaiq.com/solutions/everclean/>.

**Hart Energy. 2024.** Natural Gas Producers' Game Plan for LNG: Wait Out 2024. *Hart Energy*. 2024.

**Hayden, Benjamin. 2023.** Maritime Innovations: Evolution in vessel design. *WORK BOAT*. 2023.

**Heinemann, C., και συν. 2019.** Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland, Zusammenfassung und Einordnung des Wissensstands zur Herstellung und Nutzung strombasierter Energieträger und Grundstoffe. *Oeko-Institut*. 2019.

**Hellenicshippingnews. 2021.** Gagarin Prospect completes first ever LNG Aframax tanker fuelling in USA. *International Shipping News*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.hellenicshippingnews.com/gagarin-prospect-completes-first-ever-lng-afamax-tanker-fuelling-in-usa/>.

**Hirokazu Kaji. 2023.** The Power of Marine Coatings: Driving Efficiencies to Enable the Future Fuels Transition. *Coatings World*. [Ηλεκτρονικό] 2023. [https://www.coatingsworld.com/contents/view\\_online-exclusives/2023-11-09/the-power-of-marine-coatings-driving-efficiencies-to-enable-the-future-fuels-transition/](https://www.coatingsworld.com/contents/view_online-exclusives/2023-11-09/the-power-of-marine-coatings-driving-efficiencies-to-enable-the-future-fuels-transition/).

**HMM. 2024.** HMM introduces Supply Chain Carbon Calculator for effective measurement of GHG emissions. *HMM*. [Ηλεκτρονικό] 2024. <https://www.hmm21.com/company/newsDetail.do?seq=3001093&cateCd=C001002000000>

**Hoেকে, Laurens Van, και συν. 2021.** Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Royal Society of Chemistry*. 2021.

**Horton, G., και συν. 2022.** Technological, operational and energy pathways for maritime transport to reduce emissions towards 2050. *Final report for OGCI/Concawe. Ricardo Energy & Environment*. 2022.

**IEA. 2023.** International Shipping. *IEA.ORG*. [Ηλεκτρονικό] 2023. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en).

— **2021.** *World Energy Outlook 2021*. Paris : International Energy Agency, 2021.

— **2023.** *International shipping - IEA*. 2023.

**IIF IIR. 2021.** Growing popularity of LNG as a fuel in maritime and land transport. *IIF IIR*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://iifiir.org/en/news/growing-popularity-of-lng-as-a-fuel-in-maritime-and-land-transport>.

— **2023.** The LNG-fuelled fleet continues to grow. *IIF IIR*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://iifiir.org/en/news/the-lng-fuelled-fleet-continues-to-grow>.

**Ilias, Loukas, και συν. 2023.** Leveraging extreme scale analytics, AI and digital twins for maritime digitalization: the VesselAI architecture. *Sec. Data Mining and Managemen*. 2023, 6.

**IMO. 2023.** 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS. *MEPC 80/WP*. 2023.

— **2021.** *Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) – Initial IMO guidance on EEXI (MEPC 76/7/Add.1)*. 2021.

— **2020.** *Fourth Greenhouse Gas Study 2020*. 2020.

— **2020.** *Fourth IMO GHG Study 2020*. London, UK : International Maritime Organization, 2020.

— **2023.** Hull coating. *Glomeep.imo*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://glomeep.imo.org/technology/hull-coating/>.

— **2016.** *Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility*. London : International maritime organization , 2016.

— **2023.** *Update on the IMO Future Fuels & Technology Project (FFT Project)*. s.l. : IMO, 2023.

— **2017.** *Emissions reduction through economies of scale in container shipping*. 2017.

— **2023.** International Maritime Organization (IMO) adopts revised strategy to reduce greenhouse gas emissions from international shipping. *IMO*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>.

— **2016.** *Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility*. s.l. : International maritime organization , 2016.

**International Gas Union. 2023.** World Lng Report. *IGU*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.igu.org/resources/lng2023-world-lng-report/>.

**International Maritime Organization. 2023.** Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA Guidelines). *IMO.org*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Lifecycle-GHG---carbon-intensity-guidelines.aspx>.

—. **2021.** : Energy efficiency of ships, Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption Database in GISIS. 2021.

**International Transport Forum. 2019.** *Decarbonising Maritime Transport: Pathways to Zero-Carbon Shipping by 2035*. 2019.

**IRENA. 2020.** *Renewable Energy Highlights*. International Renewable Energy Agency. s.l. : IRENA, 2020.

—. **2015.** *RENEWABLE ENERGY OPTIONS FOR SHIPPING*. s.l. : International Renewable Energy Agency, 2015.

**Jallal, Craig. 2021.** Hull coatings: searching for savings. *Riviera*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/hull-coatings-searching-for-savings-67910>.

**Jessica Casey. 2023.** The rise of LNG-powered vessels in container shipping. *LNG Industry*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.lngindustry.com/special-reports/21112023/the-rise-of-lng-powered-vessels-in-container-shipping/>.

**Jiang, L., Kronbak, J. και Christensen, L.P. 2014.** The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. *Emission Control Areas and their Impact on Maritime Transport*. 2014, 28, σσ. 19-27.

**Jotun. 2023.** Hull Skating Solutions. [Ηλεκτρονικό] 2023. [https://www.jotun.com/no-en/industries/solutions-and-brands/hull-skating-solutions/overview?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign={{campaign.name}}&utm\\_term={{paid.keyword}}&gclid=Cj0KCQiAhomtBhDgARIsABcaYyINryrm1j0RuTcLm4eMXopRhTbmwaO7jwCxEWYD9oU](https://www.jotun.com/no-en/industries/solutions-and-brands/hull-skating-solutions/overview?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign={{campaign.name}}&utm_term={{paid.keyword}}&gclid=Cj0KCQiAhomtBhDgARIsABcaYyINryrm1j0RuTcLm4eMXopRhTbmwaO7jwCxEWYD9oU).

**Kajaste, Raili, Hurme, Markku και Oinas, Pekka. 2018.** Methanol-Managing greenhouse gas emissions in the production chain by optimizing the resource base. *AIMS Energy*. 2018.

**Kasten, Peter και Heinemann, Christoph . 2019.** Not to be taken for granted: climate protection and sustainability through PtX, Discussion of requirements for and first approaches to developing verification criteria for a climate-friendly and sustainable production of PtX. *Impulse paper on behalf of BUND as part of the Copernicus project "P2X*. Oeko-Institut, 2019.

**Katsoulakos, Takis. 2022.** ‘Digital Twin for Green Shipping’ project launches. *Digital Ship*. 2022.

**KAWAKITA, CHIHARU, SATO, SHINSUKE και OKIMOTO, TAKAHIRO. 2015.** Application of Simulation Technology to Mitsubishi Air Lubrication System . *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2015, 52.

**Koberle, AG, Gernaat, DE και Vuuren, DP. 2015.** Assessing current and future technoeconomic potential of concentrated solar power and photovoltaic electricity. *Energy*. 2015, 89, σσ. 739-756.

**Kurtz, S. 2011.** Opportunities and challenges for development of nature concentrating photovoltaic power industry. *National Renewable Energy Laboratory 5200-43208*. (NREL/TP), 2011.

**LNG Prime Staff. 2022.** CMA CGM orders six methanol-fueled containerships in China. *LNGPrime*. [Ηλεκτρονικό] 8 August 2022. <https://lngprime.com/asia/cma-cgm-orders-six-methanol-fueled-containerships-in-china/58880/>.

**LR - Lloyd's Register. 2019.** Fuel production cost estimates and assumptions. *UMAS*. 2019.

**Lu, Yu, Shao, Wu και Gu, Zhuhao. 2023.** Research on ship motion characteristics in a cross sea based on computational fluid dynamics and potential flow theory. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2023, 17.

**Maersk. 2023.** MAERSK. <https://www.maersk.com/news/articles/2022/12/12/maersk-accelerating-the-transition-from-fossil-fuel-follower-to-green-industry-leader>. [Ηλεκτρονικό] 2023.

**Malloupas, G. και Yfantis, E. 2021.** Decarbonization in shipping industry: a review of research, technology development, and innovation proposals. *J Mar Sci Eng*. 2021, 9.

**Malmmgren, E. 2021.** The environmental performance of a fossil-free ship propulsion system with onboard carbon capture – a life cycle assessment of the HyMethShip concept. *Sustainable Energy & Fuels*. 2021, 5, σσ. 2753-2770.

**MAN energy solutions. 2023.** Designing the engines of the future. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.man-es.com/discover/designing-the-engines-of-the-future>.

**MAN Energy Solutions. 2022.** Hydrogen in Shipping. *MAN-ES*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q4-2023/Download/hydrogen-in-shipping/faffa612-4edc-4a2a-a5f9-df89c632a431/Future-Fuels-Hydrogen/CDF484519D1857D3E307966C340527D91C91E793/>.

**Manjur Khan. 2020.** Liquefied Natural Gas (LNG): Exploration & Production Process. *Priyoaustralia*. [Ηλεκτρονικό] 2020. <https://priyoaustralia.com.au/articles/research-paper/2017/liquefied-natural-gas-lng-exploration-production-process/>.

**Marine Insight. 2019.** Hapag-Lloyd First In World To Convert Large Container Ship To LNG. *Marine Insight*. [Ηλεκτρονικό] 2019. <https://www.marineinsight.com/shipping-news/hapag-lloyd-first-in-world-to-convert-large-container-ship-to-lng/>.

**Marine Pollution Bulletin. 2020.** *Green maritime transportation: Hybrid-electric ferry case study for GHG reduction*. 2020.

**MarineLink. 2022.** Armach Robotics Launches Its First Hull Service Robot. *MarineLink*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.marinelink.com/news/armach-robotics-launches-first-hull-496576>.

**Maritime Foundation UK. 2021.** Hydrogen for marine power. *Maritime Foundation*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.maritimefoundation.uk/publications/maritime-2021/hydrogen-for-marine-power/>.

**Mekhilef, S., Saidur, R. και Safari, A. 2011.** A review on solar energy use in industries. *Renew Sustain Energy Rev*. 2011, Τόμ. 15, σσ. 1777-1790.

Methanol Institute, How is methanol made? [Ηλεκτρονικό]  
<https://www.methanol.org/methanol-basics/overview/how-is-methanol-made-.aspx>.

**Meyer Werft. 2019.** COSTA SMERALDA. *Meyer Werft*. [Ηλεκτρονικό] 2019.  
[https://www.meyerwerft.de/en/ships/costa\\_smeralda.jsp](https://www.meyerwerft.de/en/ships/costa_smeralda.jsp).

—. **2023.** Silver Nova. *Meyer Werft*. [Ηλεκτρονικό] 2023.  
[https://www.meyerwerft.de/en/ships/silver\\_nova.jsp](https://www.meyerwerft.de/en/ships/silver_nova.jsp).

**Mfame team. 2017.** The first methanol fuel cell powered vessel. *MFAME*. [Ηλεκτρονικό] 2017.  
<https://mfame.guru/first-methanol-fuel-cell-powered-vessel/>.

**MMKMC - Maersk Mc-Kinney Møller Center. 2021.** Methanol as a marine fuel - Prospects for the shipping industry, Documentation of assumptions for NavigaTE 1.0. *Maersk Mc-Kinney Møller Center Zero Carbon Shipping*. [Ηλεκτρονικό] 2021.  
<https://www.zerocarbonshipping.com/>.

**Mohammed, A, και συν. 2015.** A review of process and operational system control of hybrid photovoltaic/diesel generator systems. *Renew Sustain Energy Rev*. 2015, Τόμ. 44, σσ. 436-446.

**Moore, Rebecca. 2023.** Data and analytics drive coatings developments. *Riviera*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/data-and-analytics-drive-coatings-developments-78520>.

**MSC. 2019.** World's Largest Container Ship Completes First Voyage from Asia to Europe. *MSC*. [Ηλεκτρονικό] 2019. <https://www.msc.com/en/newsroom/press-releases/2019/august/worlds-largest-container-ship-completes-first-voyage-from-asia-to-europe>.

**Nature Materials. 2021.** Graphene on the pilot line. *Nature Materials*. 2021, 20.

**Noury, Philippe, και συν. 2022.** Lightweight construction for advanced shipbuilding-recent development. 2022.

**Ocean Robotics Planet. 2022.** Armach Robotics Announces First Successful Over-the-horizon Trial of Hull Service Robot. *Ocean Robotics Planet*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://oceanroboticsplanet.com/armach-robotics-announces-first-successful-over-the-horizon-trial-of-hull-service-robot-20-12-2022>.

**Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. 2020.** Fuel Cells. [Ηλεκτρονικό] 2020. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>.

**Olah, G.A., Geoppert, A. και Surya Prakash, G.K. 2009.** “Beyond oil and gas: The methanol economy. *Wiley-VCH*. 2nd Edition, 2009.

**Olah, G.A., Goeppert, A. και Prakash, G.K.S. 2018.** Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy. *Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*. 2018.

**Olmer, N., και συν. 2017.** Greenhouse Gas Emissions From Global Shipping, 2013-2015. *The International Council on Clean Transportation*. 2017, σσ. 1-38.

**ORCA AI. 2023.** A fully automated lookout on the bridge. *ORCA AI*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.orca-ai.io/>.

**Paint Coatings Industry. 2006.** Polymer Binders Represent a Major Breakthrough for Self-Polishing Marine Antifoulant Paints. *PCI*. [Ηλεκτρονικό] 2006. <https://www.pcimag.com/articles/85368-polymer-binders-represent-a-major-breakthrough-for-self-polishing-marine-antifoulant-paints>.

**Paul, Corey. 2023.** Commodities 2024: Coming US LNG supply wave to inch closer as new projects near startup. *S&P Global Commodity Insights*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/lng/122823-coming-us-lng-supply-wave-to-inch-closer-in-2024-as-new-projects-near-startup>.

**Paulson, Midhu και Chacko, Mariamma. 2019.** Integrating Wind Electrical Energy for the Marine Electrical Power System. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019, 9, σσ. 4413-4418.

—. 2019. Marine Photovoltaics: A review Of Research And Developments, Challenges And Future Trends. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*. 2019, Τόμ. 8.

**Piciu, GC και Trica, CL. 2014.** A possible classification of renewable resources in the context. 2014.

**Primo Nautic. 2023.** AI in Maritime Industry: An Overview and Future Possibilities. *Primonautic*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://primonautic.com/blog/ai-in-maritime-industry-an-overview-and-future-possibilities/>.

**Project Finder/Pa-X-ell2.** HT-PEM fuel cell as an energy system on ocean-going passenger ships. *NOW-GMBH.DE*. [Ηλεκτρονικό] <https://www.now-gmbh.de/en/projectfinder/pa-x-ell2/>.

**Prussi, Matteo, και συν. 2020.** *JEC Well-To-Wheels report v5*. s.l. : European Commission, 2020.

**Qiu, YC, Sun, YW και Yuan, CQ. 2015.** Review on the application and research progress of photovoltaic ship power system. *The 3rd International Conference on Transportation Information and Safety*. 2015, σσ. 523-527.

**Reinsch, W.A. και O'Neil, W. 2021.** Hydrogen: The Key to Decarbonizing the Global Shipping Industry? *CSIS*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.csis.org/analysis/hydrogen-key-decarbonizing-global-shipping-industry>.

**Rivarolo, M., και συν. 2021.** Multi-criteria comparison of power generation and fuel storage solutions for maritime application. *Energy Convers Manag*. 2021, 244.

**RiverCell2.** [Ηλεκτρονικό] <https://www.e4ships.de/english/inland-shipping/rivercell2/>.

**SAFETY4SEA. 2022.** Key challenges and opportunities of hydrogen in shipping's decarbonization transition. *SAFETY4SEA*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://safety4sea.com/what-are-the-challenges-and-opportunities-of-hydrogen-in-shippings-decarbonization-transition/>.

**Safety4Sea. 2019.** Report summarizes air lubrication technology for shipping. [Ηλεκτρονικό] 2019. <https://safety4sea.com/report-summarizes-air-lubrication-technology-for-shipping/>.

**Sánchez, R., Perrotti, D. και Gomez Paz Fort, A. 2021.** Looking into the future ten years later: big full containerships and their arrival to south American ports. *Journal of Shipping and Trade*. 2021.

**SEA-LNG. 2023.** BUNKERING : LNG infrastructure is growing rapidly. It can be bunkered at most key ports today, including major marine fuel bunkering hubs. *Sea-Lng*. 2023.

**SGMF. 2021.** Updated independent LIFECYCLE GHG STUDY confirms LNG reduces shipping emissions by up to 23%. *SGMF*. [Ηλεκτρονικό] 2021. <https://www.sgmf.info/posts/updated-independent-lifecycle-ghg-study-confirms-lng-reduces-shipping-emissions-by-up-to-23>.

**Ship & Bunker. 2024.** LNG-Powered Ships Pass 1000 Vessel Milestone. *Ship & Bunker*. [Ηλεκτρονικό] 2024. <https://shipandbunker.com/news/world/158058-Ing-powered-ships-pass-1000-vessel-milestone>.

**Ship & Bunker News. 2015.** LNG-Powered Container Ship Perla Del Caribe Successfully Bunkered for the first time. *Ship and Bunker News*. [Ηλεκτρονικό] 2015. [hipandbunker.com/news/am/465023-Ing-powered-container-ship-perla-del-caribe-successfully-bunkered-for-the-first-time](https://shipandbunker.com/news/am/465023-Ing-powered-container-ship-perla-del-caribe-successfully-bunkered-for-the-first-time).

**Ship Technology. 2019.** AIDAnova LNG-Powered Cruise Ship. *Ship Technology*. [Ηλεκτρονικό] 2019. <https://www.ship-technology.com/projects/aidanova-Ing-powered-cruise-ship/>.

**Shipping Telegraph. 2024.** First LNG Bunkering Vessel Launched For Seaspán. *Shipping Telegraph Daily Shipping News*. [Ηλεκτρονικό] 2024. <https://shippingtelegraph.com/shipyard-news/first-Ing-bunkering-vessel-launched-for-seaspán/>.

**Silverstream Technologies. 2023.** WHAT IS AIR LUBRICATION? *Silverstream*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.silverstream-tech.com/what-is-air-lubrication/>.

**Slade, R., Bauen, A. και Gross, R. 2014.** Global bioenergy resources. *Nature Climate Change*. 2014, 4.

**Snyder, John. 2022.** Global LNG bunker vessel fleet to exceed 50 vessels by 2024. *Riviera*. [Ηλεκτρονικό] 2022. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/global-Ing-bunker-vessel-fleet-to-exceed-50-vessels-by-2024-71924>.

**Sollai, S., και συν. 2023.** Renewable methanol production from green hydrogen and captured CO<sub>2</sub>: A techno-economic assessment. 2023.

**Stenaline. 2023.** StenaLine. <https://stenaline.com/media/stories/stena-germanica-refuels-with-recycled-methanol-from-residual-steel-gases/>. [Ηλεκτρονικό] 2023.

**Sustainable Ships. 2023.** The State of Methanol as Marine Fuel 2023. *Sustainable Ships*. [Ηλεκτρονικό] 2023. <https://www.sustainable-ships.org/stories/2023/methanol-marine-fuel>.

**The Lloyd's Register Maritime Decarbonisation Hub. 2023.** Zero Carbon Fuel Monitor. *Maritime Lloyd's*. [Ηλεκτρονικό] October 2023. [https://maritime.lr.org/l/941163/2023-10-11/8hd17/941163/16970140571AMtd0eG/LR\\_ZCFM\\_October\\_2023\\_Update\\_FINAL.pdf?\\_gl=1\\*1hevf93\\*\\_ga\\*NjYwMzg0MzA0LjE3MDQ4NDk0NTU.\\*\\_ga\\_BTRFH3E7GD\\*MTcwNDg0OTQ1NC4xLjEuMTcwNDg0OTY2MC4wLjAuMA...](https://maritime.lr.org/l/941163/2023-10-11/8hd17/941163/16970140571AMtd0eG/LR_ZCFM_October_2023_Update_FINAL.pdf?_gl=1*1hevf93*_ga*NjYwMzg0MzA0LjE3MDQ4NDk0NTU.*_ga_BTRFH3E7GD*MTcwNDg0OTQ1NC4xLjEuMTcwNDg0OTY2MC4wLjAuMA...)



**TMC. 2020.** A brief introduction to air lubrication systems (ALS). [Ηλεκτρονικό] 2020. <https://www.tmc.com/blog/article/brief-introduction-air-lubrication-systems-als>.

**Tyndall. 2022.** *Shipping's Role in the Global Energy Transition*; London : s.n., 2022.

**U.S. Department of Energy, National Energy Laboratory. 2014.** *Lifecycle Greenhouse Gas Perspective on Exporting Liquefied Natural Gas from the United States*. 2014.

**US Energy Information Administration. 2016.** Carbon Dioxide Emissions Coefficients. 2016.

**Van Leeuwen, J. και Monios, J. 2022.** Decarbonisation of the shipping sector – time to ban fossil fuels. *Mar Policy*. 2022, 146.

**Vidal, J. 2009.** Health risks of shipping pollution have been 'underestimated'. *Environment, Pollution*. The Guardian, 2009.

**Wang, B., και συν. 2018.** An MILP Model for the Reformation of Natural Gas Pipeline Networks with Hydrogen Injection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018, 43, σσ. 16141-16153.

**Wang, Peng, και συν. 2023.** Big data-driven carbon emission traceability list and characteristics of ships in maritime transportation-a case study of Tianjin Port. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2023.

**Wang, Yunlong, και συν. 2022.** Analysis on the Development of Wind-assisted Ship Propulsion Technology and Contribution to Emission reduction. *Earth and Environmental Science*. 2022, 966.

*Wind propulsion optimization and its integration with solar power.* **Nsanjama Nyanya, Mphatso και Huy, Vu Ba. 2019.** Malawi & Vietnam : s.n., 2019.

**Wissner, Nora, και συν. 2023.** *Methanol as a marine fuel*. Berlin : Oiko-Institut, 2023.

**World Shipping Council. 2020.** *Container Shipping: The Green Choice*. 2020.

**Xie, Wenxin, και συν. 2023.** Maritime greenhouse gas emission estimation and forecasting through AIS data analytics: a case study of Tianjin port in the context of sustainable development. *Sec. Marine Pollution*. 2023, 10.