



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ | HELLENIC REPUBLIC  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ | UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ | SCHOOL OF ENGINEERING  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ | DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

“Διπλωματική Εργασία”

Τεχνολογίες Καυσίμων στη Ναυσιπλοΐα

Όνομα φοιτητή: Μιχαήλ Γεωργόπουλος  
Επιβλέπων: Γεώργιος Μαρνέλλος

Ιούνιος 2024

Κοζάνη

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

“Διπλωματική Εργασία”

Τεχνολογίες Καυσίμων στη Ναυσιπλοΐα

Όνομα φοιτητή: Μιχαήλ Γεωργόπουλος

Επιβλέπων: Γεώργιος Μαρινέλλος

Ιούνιος 2024

Κοζάνη

## **Περίληψη**

Η ναυτιλία αποτελεί διαχρονικά έναν από τους σημαντικότερους τρόπους επικοινωνίας, επαφών και εμπορίου για την ανθρωπότητα. Τα τελευταία χρόνια της παγκοσμιοποίησης και των εκτεταμένων εφοδιαστικών αλυσίδων, οι μεταφορές μέσω της ναυτιλίας είναι το κλειδί της παγκόσμιας οικονομίας. Ωστόσο, η ναυτιλία ευθύνεται επίσης για μεγάλο ποσοστό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, που συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί και ερευνώνται εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα. Στην παρούσα εργασία, αφού παρουσιάσουμε συνοπτικά την παρούσα κατάσταση, μελετάμε εναλλακτικούς τρόπους πρόωσης για ποντοπόρα πλοία (εμπορικά και επιβατικά), με μειωμένες ή μηδενικές εκπομπές και δείχνουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

## **Summary**

Shipping has always been one of the most important means of communication, contact and commerce that mankind has devised. In the last years, the era of globalization and extended supply chains, ship-based transport are essentially the key to the global economy. However, ship-based transport is also responsible for a big part of greenhouse gas emissions, that contribute to climate change. Hence, there have been various proposals for alternative shipping fuels. In the present text, after shortly presenting the present situation, we examine alternative ways to move big, ocean-going ships (transport and passenger), with low or zero emissions, showing their advantages and disadvantages.

## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	8
1.1	8
1.1.1	8
1.1.2	10
1.1.3	12
1.2	13
1.2.1	13
1.3	21
1.3.1	21
1.3.2	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	27
2.1	27
2.1.1	27
2.1.2	30
2.2	34
2.2.1	34
2.2.2	36
2.2.3	36
2.2.4	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	43
3.1	43
3.2	43
3.2.1	43
3.2.2	46
3.2.3	50
3.2.4	51
3.2.5	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.2.6	51
3.2.7	52
3.2.8	54
3.3	55
3.3.1	55
<b>3.3.2</b>	57
3.3.3	61
3.4	62
3.4.1	62
3.4.2	64

3.4.3	66	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup>		71
4.1	67	
4.2	70	
4.3	71	
4.3.1	72	
4.3.2	73	
4.3.3	75	
4.3.4	76	
4.3.5	78	
4.3.6	81	
4.4	83	
4.5	84	
4.6	86	
4.6.1	Πρόγραμμα «NEMO H2» / PEM	87
4.6.2	Πρόγραμμα «SF-BREEZE» / PEM	89
4.6.3	Πρόγραμμα «PA-X-ELL» / HT-PEM	90
Αρχές Ασφάλειας και Ρυθμιστικό Πλαίσιο		91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup>		96
5.1	95	
5.2	99	
<b>ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>		101
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		103

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Εξέλιξη του παγκοσμίου εμπορίου της θάλασσας	9
Εικόνα 2: Ιδιοκτησία του παγκόσμιου στόλου	11
Εικόνα 3:Ελληνόκτητα πλοία χωρητικότητας άνω των 1000GT	12
Εικόνα 4:Απεικόνιση προωστήριου αμμοστροβίλου KAWASAKI UA-360.	14
Εικόνα 5:Απεικόνιση διάταξης κύκλου Rankine, εφαρμοσμένη σε λειτουργία πρόωσης πλοίου	15
Εικόνα 6:Σχηματική απεικόνιση απλού αεριοστροβίλου	16
Εικόνα 7: Απεικόνιση προωστήριου αεριοστροβίλου πολεμικού πλοίου.	16
Εικόνα 8:Απεικόνιση βασικών εξαρτημάτων παλινδρομικής MEK	17
Εικόνα 9:Δεκαεξακύλινδρη μεσόστροφη τετράχρονη πετρελαιομηχανή τύπου (V)	20
Εικόνα 10:Παγκόσμιες εκπομπές CO <sub>2</sub> από διαφορετικούς οικονομικούς τομείς.	23
Εικόνα 11:Εκπομπές CO <sub>2</sub> με βάση το μεταφορικό έργο, από διάφορες κατηγορίες πλοίων, οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές	24
Εικόνα 12:Μεταβολή στη μέση τιμή της θερμοκρασίας της Γης	28
Εικόνα 13:Η αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας.	29
Εικόνα 14: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για διάφορα καύσιμα. Τα λεγόμενα "καθαρά" καύσιμα, μπορεί να έχουν σημαντική εκπομπή κατά την παραγωγή (πορτοκαλί) και όχι την καύση τους (μπλε)	33
Εικόνα 15:Το λογότυπο του IMO	34
Εικόνα 16:Σχηματική παράσταση προδιαγραφών εκπομπών SO <sub>x</sub> από τον IMO	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
Εικόνα 17:Τρέχουσες και επερχόμενες περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECAs) ανά τον κόσμο	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 18:Πλοία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)	44
Εικόνα 19:Σύγκριση εκπομπών HFO σε σχέση με LNG	45
Εικόνα 20:Σύγκριση τιμών LNG και MDO	45
Εικόνα 21:Παραγωγή βιοκαυσίμων στην Ε.Ε	49
Εικόνα 22:Τιμές πώλησης LPG σε σύγκριση με πετρέλαιο και φυσικό αέριο	51
Εικόνα 23:Διάταξη κυψέλης καυσίμου H <sub>2</sub>	52
Εικόνα 24:Διάταξη συστήματος κυψελών καυσίμου σε Y/B τ.209	53
Εικόνα 25:Το ηλιακό σκάφος MS Turanor PlanetSolar	61
Εικόνα 26:Σχηματική παράσταση χρήσης πανιού τύπου χαρταετού και των εξαρτημάτων του	63
Εικόνα 27:Το πλοίο E-ship1 με τους τέσσερις (4) ρότορες	64
Εικόνα 28:M/S Viking Grace με τοποθετημένο ρότορα	64
Εικόνα 29:Οι σχεδιαστικές γραμμές του E/S Orcelle	66
Εικόνα 30:Το "Viking Lady" στα ανοιχτά της βόρειας θάλασσας	67
Εικόνα 31:Τοποθέτηση της κυψέλης καυσίμου στο σκάφος	68
Εικόνα 32:NYK SUPER ECO SHIP 2030	69
Εικόνα 33:Το υβριδικό πλοίο Auriga Leader	70
Εικόνα 34:Η κυψέλη καυσίμου παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση απευθείας από καύσιμο	71
Εικόνα 35: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 36: Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>defined.</b>	
Εικόνα 37: Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 38: Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 39:Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου	80
Εικόνα 40:Κυψέλη ακυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 41:Nemo H <sub>2</sub>	87
Εικόνα 42:Sf-breeze	89
Εικόνα 43:Ανάπτυξη κυψέλης καυσίμου τύπου PEM στην DLR	90
Εικόνα 44:Σχηματική απεικόνιση σωληνώσεων διπλού τοιχώματος	92
Εικόνα 45:Διαμόρφωση βαλβίδας διπλής ροής	93

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Η συνεισφορά της ναυτιλίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. (Πηγή: IMO, 2009)	26
Πίνακας 2: Ο συντελεστής εκπομπής για τους κύριους ρύπους σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου	32
Πίνακας 3: Ο συντελεστής εκπομπής για τους κύριους ρύπους σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ	33
Πίνακας 4: Προδιαγραφές εκπομπών SO <sub>x</sub> από τον IMO	41
Πίνακας 5: Προδιαγραφές εκπομπών NO <sub>x</sub> βάσει του IMO	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1.1 Ο ρόλος της ναυτιλίας σε παγκόσμιο επίπεδο

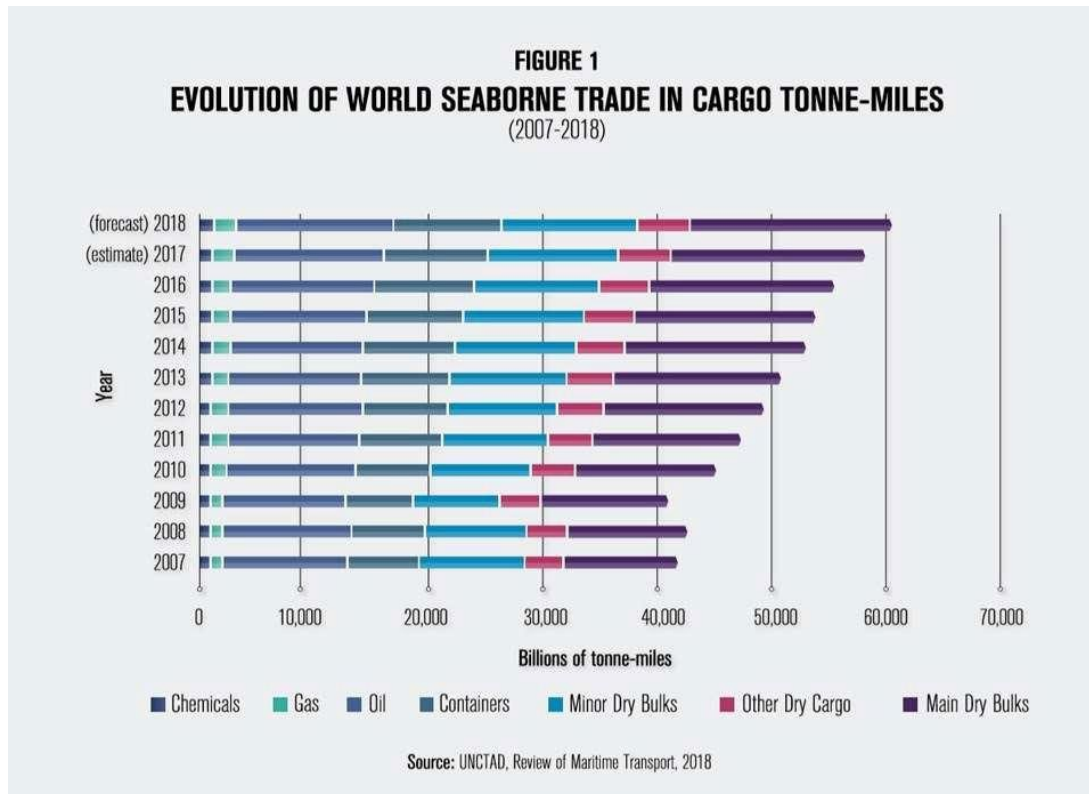
Οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν ένα αναπόσπαστο μέρος της παγκόσμιας οικονομίας. Το σύστημα των θαλάσσιων μεταφορών αφορά σε ένα δίκτυο το οποίο αποτελείται από εξειδικευμένα πλοία, από λιμένες, οι οποίοι διαθέτουν υποδομές φορτο-εκφόρτωσης εμπορευμάτων, από εργοστάσια σε τερματικούς σταθμούς και από κέντρα διανομής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θαλάσσιες μεταφορές θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως το αναγκαίο συμπλήρωμα ή το υποκατάστατο άλλων τρόπων μεταφοράς εμπορευμάτων. Παραδείγματος χάριν, κάποια εμπορεύματα δεν είναι δυνατό να μεταφερθούν με άλλο τρόπο πλην της θάλασσας με αποτέλεσμα αυτός ο τρόπος μεταφοράς να μην μπορεί να αντικατασταθεί (Corbett & Winebrake, 2008).

Ωστόσο, οι αεροπορικές μεταφορές έχουν αντικαταστήσει ένα σημαντικό μέρος των θαλάσσιων μεταφορών με τη διαφορά ότι δεν μπορούν να μεταφέρουν μεγάλο μέρος φορτίων εξαιτίας της δυνατότητας μεταφοράς μόνο ελαφρύτερων εμπορευμάτων. Σε ορισμένες άλλες περιπτώσεις, οι θαλάσσιες μεταφορές μπορούν να υποκαταστήσουν τη μεταφορά με το οδικό ή το σιδηροδρομικό δίκτυο μεταφορών, ανάλογα με το κόστος, το χρόνο αλλά και τους περιορισμούς της παράδοσης. Κάποιες επιπλέον σημαντικές δραστηριότητες της ναυτιλιακής βιομηχανίας αφορούν στη μεταφορά επιβατικού κοινού, στην κάλυψη αναγκών εθνικής άμυνας, στην αλιεία και στις υπηρεσίες ναυσιπλοΐας με τη χρήση ρυμουλκών σκαφών ή με τη συντήρηση του στόλου των ναυτιλιακών επιχειρήσεων.

Η παγκοσμιοποίηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας οφείλεται στην αναγνώριση του γεγονότος ότι τόσο οι πρώτες ύλες όσο και τα προϊόντα ή οι υπηρεσίες δε βρίσκονται πάντοτε στα σημεία όπου υπάρχει το κοινό που θα τα καταναλώσει. Για το λόγο αυτό χρειάζεται η υπηρεσία των μεταφορών ώστε να φτάσουν τα προϊόντα ή οι υπηρεσίες στον τελικό καταναλωτή τους (Wonham & Carlton, 2005). Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες προϊόντων όπως είναι το πετρέλαιο, τα ορυκτά, τα σιτηρά τα οποία πρέπει να διανεμηθούν με αποτελεσματικό τρόπο σε μακρινές περιοχές από την περιοχή στην οποία βρίσκονται. Επιπλέον, η παγκοσμιοποίηση της ναυτιλίας προσδιόρισε τις αγορές εργασίας στο εξωτερικό, γεγονός που ενθάρρυνε τη μεταφορά ημι-πρώτων υλών και ενδιάμεσων προϊόντων, όπου το κόστος κατασκευής τους



ήταν χαμηλότερο (Corbett & Winebrake, 2008). **(Εικόνα 1)**



*Εικόνα 1: Εξέλιξη του παγκοσμίου εμπορίου της θάλασσας (Πηγή: UNCTAD, 2018).*

Με τη χρήση πετρελαίου χαμηλού κόστους για τη μεταφορά των προϊόντων, η οποία διευκολύνεται από τις οικονομίες κλίμακας, το κόστος ανά μονάδα των ημιτελών και ενδιάμεσων προϊόντων ελαχιστοποιήθηκε από τις αλυσίδες εφοδιασμού πολλαπλών ηπείρων. Σήμερα είναι σύνηθες να συλλέγονται τα αγροτικά προϊόντα σε μία ήπειρο, να μεταφέρονται σε άλλη για ενδιάμεση επεξεργασία, να μεταφέρονται σε μία τρίτη ήπειρο για την τελική συναρμολόγηση και στη συνέχεια να διατίθενται στην αγορά. Για παράδειγμα, το βαμβάκι που καλλιεργείται στη Βόρεια Αμερική μπορεί να αποστέλλεται σε εργοστάσια υφαντουργίας της Αφρικής και στη συνέχεια σε εργοστάσια ρουχισμού της Ασίας πριν επιστραφεί στη Βόρεια Αμερική στον τελικό χρήστη (American Bureau of Shipping , 2005).

Μία άλλη τάση που συνδέεται με την παγκοσμιοποίηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας, είναι ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η εμπορική κίνηση. Η παγκοσμιοποίηση έχει ενθαρρύνει τις συναλλαγές αγαθών και υπηρεσιών σε μικρότερα πακέτα τα οποία παραδίδονται σε σύντομο χρόνο. Αυτό έχει αυξήσει την ταχύτητα διενέργειας των εμπορευματικών μεταφορών, γεγονός που δικαιολογούσε τη χρήση γρήγορων και μικρών πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων της δεκαετίας του 1970, ενώ κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες δικαιολογούνταν η χρήση ταχύτερων και μεγαλύτερων πλοίων για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Σε μία παγκόσμια οικονομία, η εμπορευματοποίηση δίνει την δυνατότητα της ολοκληρωμένης μεταφοράς εμπορευμάτων με κάθε πιθανό τρόπο (Corbett & Winebrake, 2007).

## 1.1.2 Ο κλάδος της ελληνικής ναυτιλίας

Από το 1939 ο ελληνικός στόλος ο οποίος είχε νηολογηθεί με τη χρήση ελληνικής σημαίας, κατείχε ένα ποσοστό το οποίο ήταν ίσο με το 2.6% της παγκόσμιας ναυτιλίας. Αυτό το ποσοστό είχε καταφέρει να δώσει στην Ελλάδα την 9 θέση στην παγκόσμια κατάταξη της ναυτιλίας, ενώ σε υψηλότερες θέσεις βρισκόταν το Ηνωμένο Βασίλειο, οι Η.Π.Α., η Ιαπωνία και η Νορβηγία. Ο εμπορικός στόλος της Ελλάδας απαρτιζόταν από φορτηγά πλοία, τα οποία μπορούσαν να μεταφέρουν ένα ποσό μεγαλύτερο των 10,000 τόνων ανά πλοίο. Περί το 1945, και συγκεκριμένα στο τέλος του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, η ελληνική ναυτιλία αντιμετώπισε μία δυσμενή κατάσταση, καθώς οι απώλειές της άγγιζαν ένα ποσοστό ίσο με το 75% του αριθμού των πλοίων, συγκριτικά με το αντίστοιχο ποσοστό πριν την εκδήλωση του πολέμου. Στο δυναμικό της ελληνικής ναυτιλίας απέμειναν μόνο 120 πλοία, ενώ το 1946 οι Η.Π.Α. πούλησαν 4,500 πλοία, από τα οποία οι Έλληνες εφοπλιστές αγόρασαν τα 100. Από εκείνη τη στιγμή και έπειτα, άρχισε να παρατηρείται μία τάση ανοδικής πορείας της ελληνικής ναυτιλίας (Λύρας, 2002).

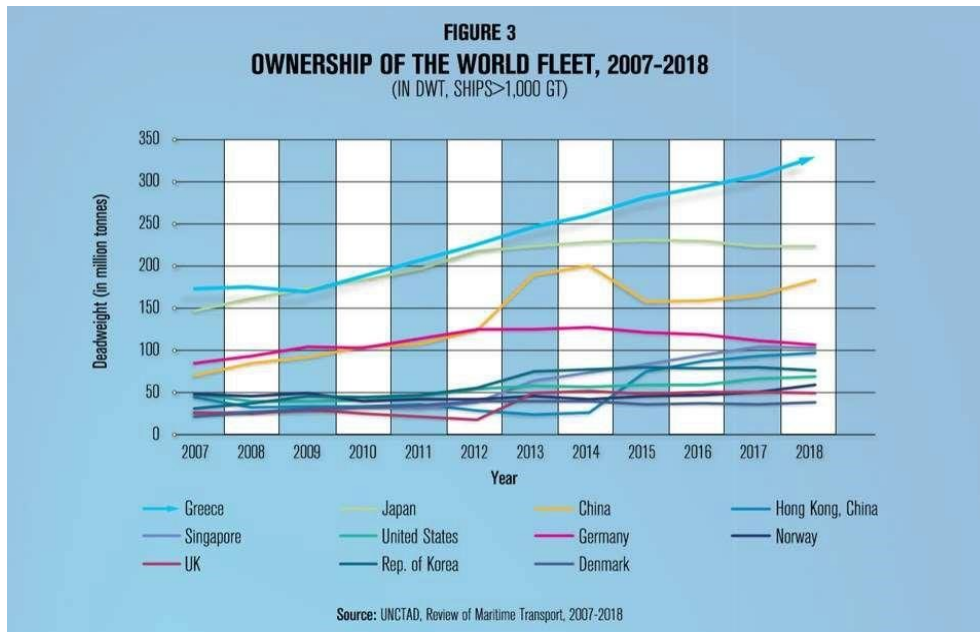
Μόλις 10 χρόνια αργότερα, το 1956, η κρίση του Σουέζ, είχε σαν αποτέλεσμα την αναζωπύρωση της παγκόσμιας οικονομίας, με την Ελλάδα να κατακτά την 3 θέση σχετικά με τη χωρητικότητα των πλοίων της. Για ακόμη μία φορά στις υψηλότερες θέσεις βρέθηκαν το Ηνωμένο Βασίλειο και οι Η.Π.Α.. Το 1960, οι Έλληνες ιδιοκτήτες πλοίων, άρχισαν την ανανέωση του στόλου τους μέσω μίας πολιτικής συγκρατημένης επέκτασης. Το ίδιο διάστημα το Λιμάνι του Πειραιά είχε ανακηρυχθεί ως ένα από τα σημαντικότερα κέντρα του σύγχρονου ναυτιλιακού κόσμου, με την πρόσοδο της εθνικής ναυτιλίας να αγγίζει την ακμή της.

Επιπλέον, κατά το 1980 η Ελλάδα στιγματίστηκε από την είσοδό της στην ΕΟΚ. Οι Έλληνες εφοπλιστές εκμεταλλεύτηκαν την υψηλή θέση του ελληνικού στόλου στην παγκόσμια κατάταξη, με αποτέλεσμα να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στο σχεδιασμό των κανονισμών της Κοινής Ευρωπαϊκής Πολιτικής της Ναυτιλίας. Η σειρά αυτών των μέτρων ψηφίστηκε και θεσπίστηκε στα τέλη του 1986.

Την ίδια περίοδο, η ναυτιλιακή αγορά παρουσίασε ανοδική πορεία σχετικά με τα ξηρά και τα υγρά φορτία. Οι κινητήριες δυνάμεις της ελληνικής ναυτιλίας αυτής ήταν η σταθερή ανάπτυξη και η ανάπτυξη των οικονομιών των χωρών της Άπω Ανατολής (Προγουλάκη, 2015).

Ένα γεγονός το οποίο σημάδεψε την ελληνική ναυτιλία τη δεκαετία του 1990, ήταν η καθιέρωση του Διεθνούς Κώδικα Ασφαλούς Διαχείρισης, σύμφωνα με τον οποίο κάθε ναυτιλιακή επιχείρηση όφειλε μέχρι την 1<sup>η</sup> Ιουλίου του 1998, να έχει ορίσει με σαφήνεια όλες τις διαδικασίες που διέπουν τη λειτουργία της σε θάλασσα και σε ξηρά. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλιζόταν η ασφαλής λειτουργία τους και η προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι ελληνικές εταιρείες αντιμετώπισαν την πρόκληση, γεγονός το οποίο τους εξασφάλισε έγκαιρα

την ανάλογη πιστοποίηση. Με την έλευση της νέας χιλιετίας, ο ελληνικός στόλος κατείχε την 1<sup>η</sup> θέση σε παγκόσμιο επίπεδο, με το στόλο του να ξεπερνά τα 3,400 πλοία, ενώ η ικανότητα μεταφοράς του άγγιζε τους 139 εκατομμύρια τόνους. Επίσης, η ελληνική σημαία κατείχε την 4<sup>η</sup> θέση παγκοσμίως ξεπερνώντας τη σημαία της Μάλτας (Ένωση Ελλήνων Εφοπλιστών, 2011-2012). **(Εικόνα 2)**

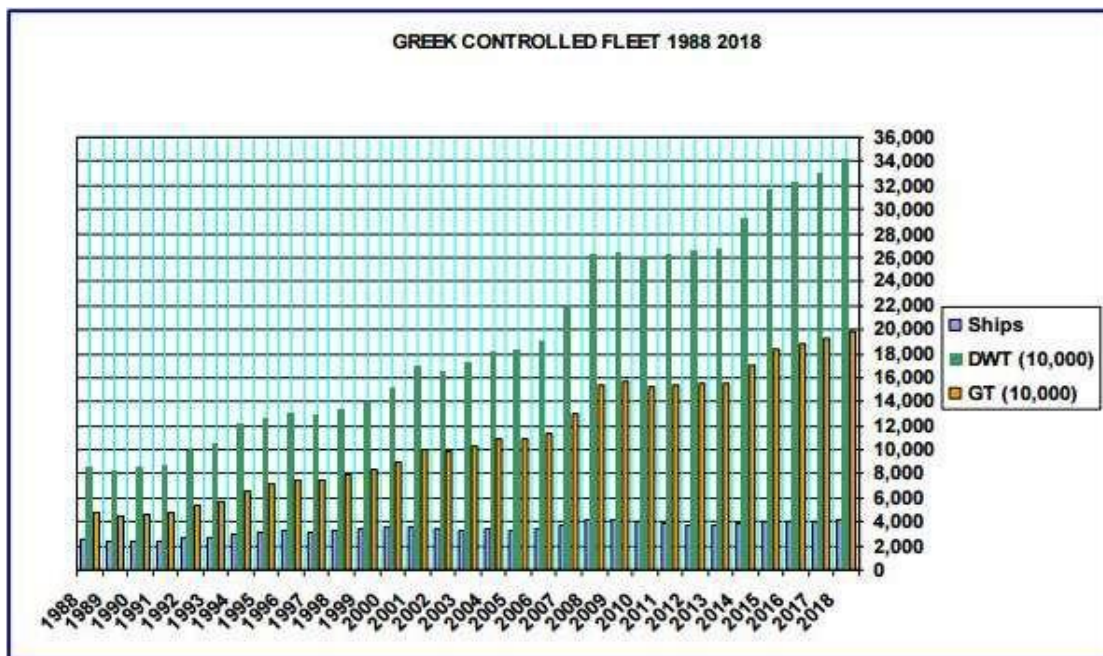


**Εικόνα 2:** Ιδιοκτησία του παγκόσμιου στόλου (Πηγή: UNCTAD, 2018).

### 1.1.3 Ο σύγχρονος στόλος των Ελλήνων

Σύμφωνα με τα ετήσια στατιστικά στοιχεία της Ελληνικής Επιτροπής Ναυτιλιακής Συνεργασίας (Greek Shipping Co-operation Committee), τα οποία προέρχονται από την εταιρεία αναλύσεων IHS Markit και αφορούν τα ελληνόκτητα πλοία χωρητικότητας άνω των 1.000 GT, ανεξαρτήτως σημαίας, ο ελληνόκτητος στόλος εξακολουθεί να αυξάνεται σε όρους DWT και GT.

Συγκεκριμένα στις 19 Μαρτίου του 2018 ο στόλος αποτελούνταν από 4.148 πλοία διαφόρων κατηγοριών, συνολικής χωρητικότητας 199.286.013 GT και μεταφορικής ικανότητας 341.925.357 DWT. Συγκριτικά με τον Μάρτιο του 2017, ο αριθμός των πλοίων ελληνικών συμφερόντων αυξήθηκε κατά 63 πλοία. Η χωρητικότητα και η μεταφορική ικανότητα των πλοίων αυξήθηκαν εξίσου, κατά 6.855.494 GT και 13.161.590 DWT, αντίστοιχα. **(Εικόνα 3)**



**Εικόνα 3:**Ελληνόκτητα πλοία χωρητικότητας άνω των 1000GT (Πηγή: Greek Shipping Co-operation Committee, Μάρτιος 2018).

Σε ό,τι αφορά τη νηολόγηση, τα ελληνόκτητα πλοία φέρουν 41 διαφορετικές σημαίες. Φαίνεται να ισοψηφούν στις πρώτες θέσεις δύο ανοιχτά νηολόγια, καθώς το 19% των ελληνόκτητων πλοίων (824 πλοία) φέρουν σημαία της Λιβερίας, και επίσης το 19% φέρουν σημαία των Marshall Islands. Ακολουθεί η σημαία της Ελλάδας με 723 πλοία συνολικής χωρητικότητας 74.537.350 τόνων, η σημαία της Μάλτας με 694 πλοία, του Παναμά με 355 πλοία και της Κύπρου και οι Μπαχάμες με 274 και 247 πλοία, αντίστοιχα.

Συγκριτικά με τα στοιχεία της περασμένης χρόνιας, προκύπτει αύξηση στα πλοία που επέλεξαν σημαία των Marshall Islands, της Λιβερίας, της Κύπρου και της Μάλτας, ενώ μείωση καταγράφηκε της ελληνικής σημαίας κατά 24 πλοία, μεταφορικής ικανότητας 672.557 DWT και χωρητικότητας 317.788 GT.

Το μερίδιο του ελληνόκτητου στόλου στον παγκόσμιο στόλο, ανέρχεται σε 7,6% σε αριθμό πλοίων, σε 13,8% σε χωρητικότητα και σε 16,4% σε όρους μεταφορικής ικανότητας.

Τα πλοία με ελληνική σημαία σε όρους αριθμού πλοίων, GT και DWT αντιπροσωπεύουν το 1,3%, 3 % και 3,6%, αντίστοιχα, του παγκόσμιου στόλου.

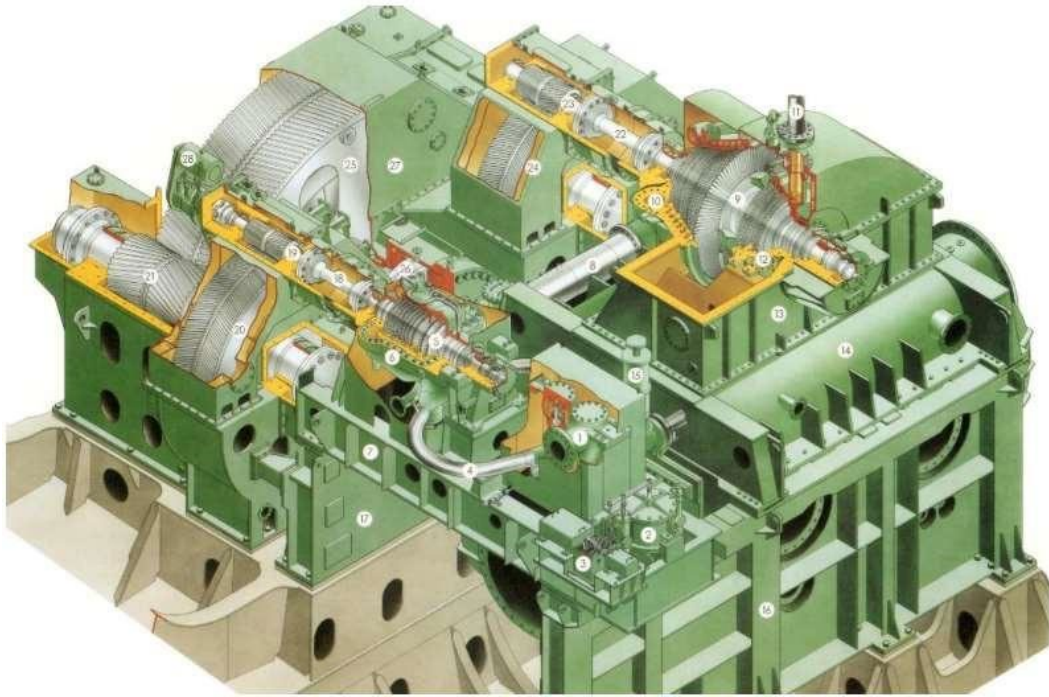
## **1.2 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

### **1.2.1 Ναυτικές Μηχανές**

Στη παγκόσμια ναυτιλία οι ναυτικές μηχανές Diesel είναι ο επικρατέστερος τύπος μηχανής τόσο για την πρόωση όσο και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα βοηθητικά μηχανήματα. Συνήθως παρατηρούμε ότι τα μεγάλα σε μέγεθος, ποντοπόρα, φορτηγά πλοία, χρησιμοποιούν κυρίως για την πρόωση τους μηχανές Diesel χαμηλών και μεσαίων στροφών, αντίθετα πλοία που η αυξομείωση ταχύτητας είναι επιθυμητή όπως κάποια επιβατηγά ή πολεμικά πλοία, είναι εξοπλισμένα με ατμοστρόβιλους ή αεριοστρόβιλους. Ο αριθμός αυτής της κατηγορίας των πλοίων είναι ιδιαίτερα μικρός, καθώς, συγκρινόμενες με τις μηχανές Diesel δεν είναι εξίσου αποδοτικές.

#### **1.2.1.1 Ατμομηχανές με ατμοστρόβιλο**

Οι ατμομηχανές με ατμοστρόβιλο ή περιστροφικές μηχανές κατατάσσονται στις μηχανές εξωτερικής καύσεως, όπου αποτελούνται από έναν περιστρεφόμενο άξονα, που έχει τροχούς ή τύμπανο με πτερύγια ή συνδυασμό και των δυο. Ο στρόβιλος αποτελούμενος από έναν τροχό με πτερύγια, προσπίπτοντας πάνω του η ενέργεια του ατμού ο οποίος εξέρχεται με μεγάλη ορμή από ένα ακροφύσιο, με συνεχόμενη ροή, επιτυγχάνεται η περιστροφή του άξονα ώστε να παραχθεί ωφέλιμο μηχανικό έργο. **(Εικόνα 4)**

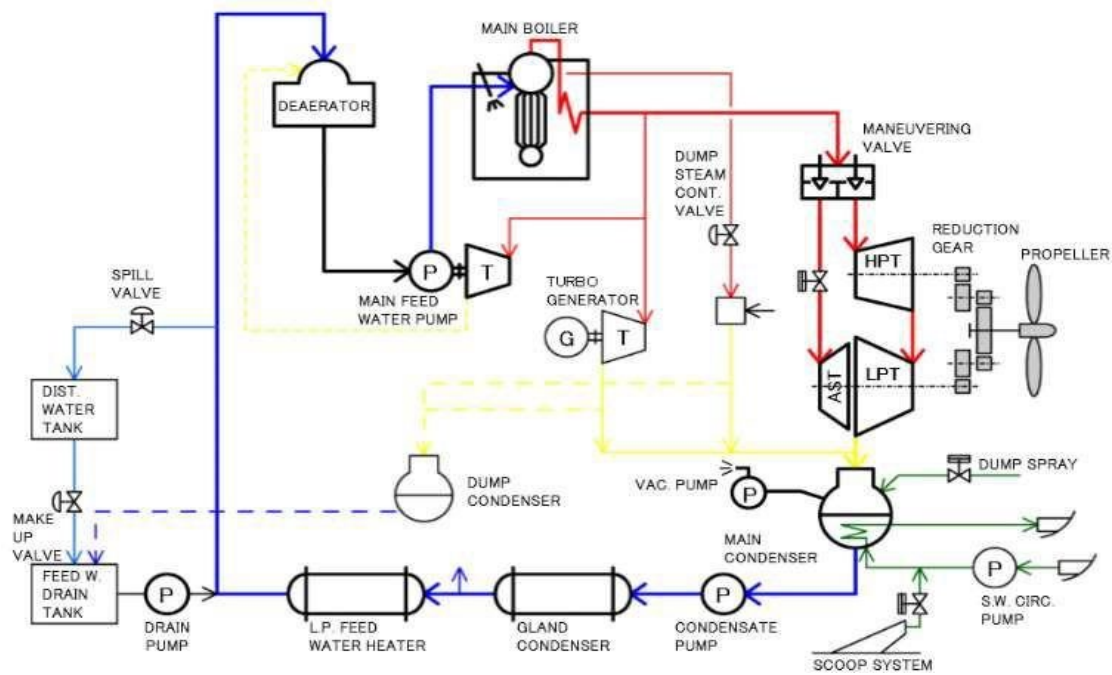


*Εικόνα 4: Απεικόνιση προωστήριου ατμοστροβίλου KAWASAKI UA-360.*

Το ωφέλιμο μηχανικό έργο με την σειρά του προέρχεται από την θερμική ενέργεια του ατμού, η οποία καθορίζεται από την πίεση και την θερμοκρασία που βρίσκεται ο ατμός. Η ολική ενέργεια που δημιουργείται προσπίπτοντας πάνω στα πτερύγια του στροβίλου εξαρτάται από την **θερμική**, τη **δυναμική** και την **κινητική** ενέργεια του ατμού, επομένως αναφερόμαστε στην θερμοκρασία, στην πίεση και στην ταχύτητα του ατμού.

Ο θερμικός κύκλος όπου πάνω σε αυτόν βασίζετε ο τρόπος λειτουργίας μιας ατμοστροβιλο εγκατάστασης είναι ο κύκλος Rankine. Τα βασικά και αναπόφευκτα στοιχεία που πρέπει να διαθέτει η εγκατάσταση είναι: **(Εικόνα 5)**

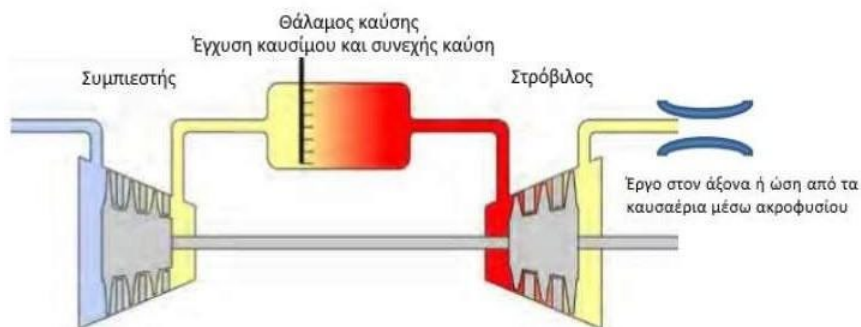
- Ο λέβητας που αποτελεί πηγή θερμικής ενέργειας, αναπτύσσοντας πολύ υψηλές θερμοκρασίες
- Ο συμπυκνωτής ή ψυγείο με χαμηλή θερμοκρασία για να δέχεται τα θερμικά απόβλητα
- Ο ατμοστρόβιλος ο οποίος παραλαμβάνει ποσά θερμότητας και τα μετατρέπει σε μηχανικό έργο
- Η αντλία όπου ανακυκλώνει το εργαζόμενο μέσο και το συμπιέζει στον λέβητα από χαμηλότερη σε υψηλότερη πίεση



**Εικόνα 5:** Απεικόνιση διάταξης κύκλου Rankine, εφαρμοσμένη σε λειτουργία πρόωσης πλοίου.

### 1.2.1.2 Αεριοστρόβιλοι ή Αεριοκινητήρες

Οι αεριοστρόβιλοι ή αεροκινητήρες κατατάσσονται στην κατηγορία των μηχανών εσωτερικής καύσεως και χαρακτηρίζονται ως περιστροφικές μηχανές συνεχομένης ροής, οι οποίες μοιάζουν με την λειτουργία και την δομή των ατμοστρόβιλων, με κυρίες διάφορες την χρησιμοποιούμενη εργαζόμενη ουσία (Εικόνες 6 και 7). Η οποία όπως αναφέραμε για τους ατμοστρόβιλους είναι το νερό – ατμός, ενώ για τους αεριοστρόβιλους είναι ο αέρας με τα καυσαέρια που παράγονται από την καύση του καυσίμου. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούν μπορεί να είναι είτε υγρά, όπως τα προϊόντα διύλισης του πετρελαίου, είτε αέρια όπως το φυσικό αέριο ή ο αεριοποιημένος άνθρακας. (Εικόνες 6-7)



**Εικόνα 6:** Σχηματική απεικόνιση απλού αεριοστρόβιλου





*Εικόνα 7: Απεικόνιση προωστήριου αεριοστροβίλου πολεμικού πλοίου.*

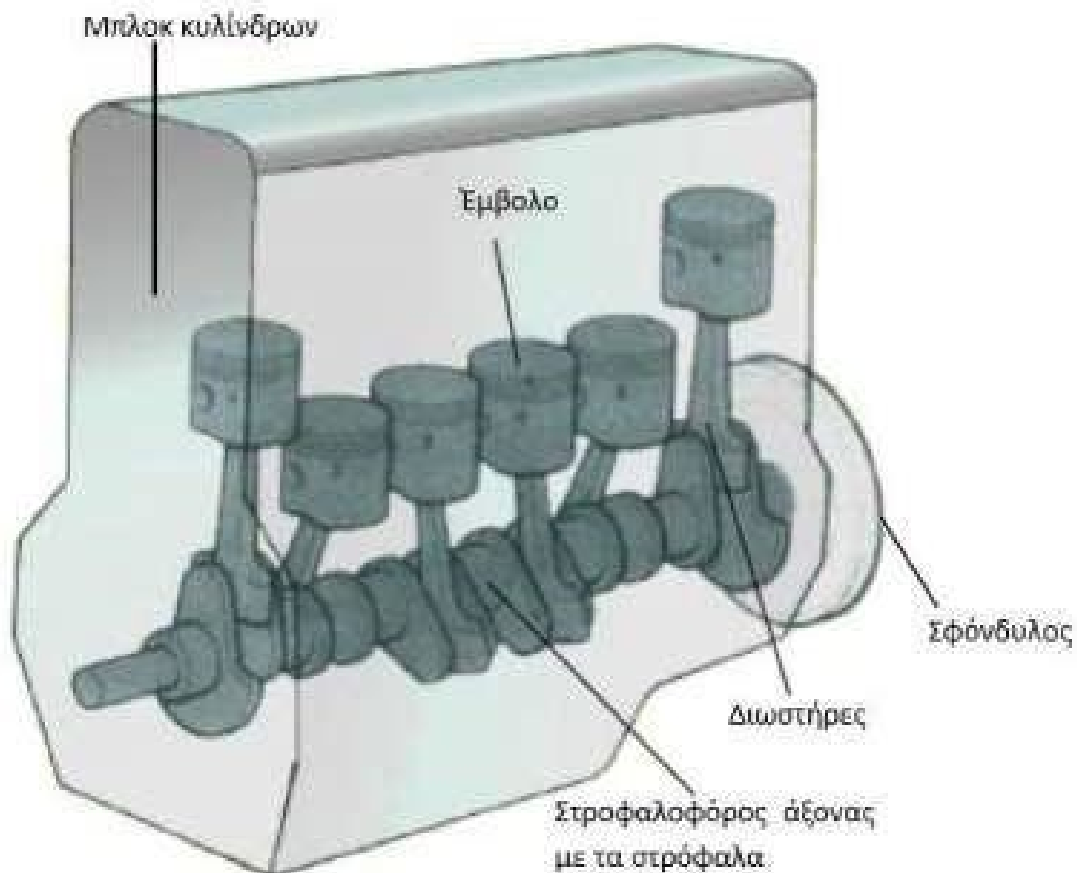
Ο αεριοστρόβιλος ως μηχανή πρόωσης πλοίου δεν παρουσιάζει μεγάλη ζήτηση πάρα μόνο σε κάποιες ειδικές κατηγορίες πλοίων, όπως **πολεμικά πλοία**, πλοία **υψηλών ταχυτήτων**, καθώς ακόμη και σε **συνδυασμό** με άλλη μηχανή παραγωγής έργου. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν είναι λειτουργικοί στις εναλλαγές φορτίων και σε λειτουργία χαμηλής ισχύος, όπως επίσης και στην αναπόδοση του πλοίου δεν είναι καθόλου εύχρηστοι. Βασικό όμως χαρακτηριστικό όλων των αεριοστροβίλων είναι ότι βασίζονται όλοι οι τύποι πάνω στο θερμοδυναμικό κύκλο Brayton.

### **1.2.1.3 Εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης**

Γενικά οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών που έχουν ανάγκη την παραγωγή ωφέλιμου μηχανικού έργου, οι οποίες καταναλώνουν θερμική ενέργεια για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας όπως έχουμε προαναφέρει.

Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούν υδρογονάνθρακες ως καύσιμη ύλη, η οποία καίγεται στο εσωτερικό των κυλίνδρων τους, έτσι και ονομάζονται μηχανές εσωτερικής καύσης. Πιο κατανοητά εισάγουν αέρα στο εσωτερικό τους, ο οποίος αναμιγνύεται με το καύσιμο που χρησιμοποιούν για να καεί. Το μίγμα αυτό αέρα – καυσίμου που καίγεται προσδίδει θερμότητα στο σύστημα, καθώς αποτελεί και το εργαζόμενο μέσο του κύκλου λειτουργίας. Μετά την καύση του μίγματος δημιουργούνται τα καυσαέρια τα οποία εξάγονται στην ατμόσφαιρα και

ακολουθεί η εισαγωγή νέου μίγματος προς καύση. (Εικόνα 8)



**Εικόνα 8:** Απεικόνιση βασικών εξαρτημάτων παλινδρομικής ΜΕΚ.

Μια σύντομη αναφορά που διακρίνει σε κατηγορίες τις παλινδρομικές μηχανές είναι:

1. Με βάση τον τρόπο έναυσης του καυσίμου που χρησιμοποιούν.

- Μηχανές έναυσης με σπινθηριστή ή βενζινομηχανές. Οι οποίες βασίζουν την λειτουργία τους στον κύκλο Otto.
- Μηχανές έναυσης με συμπίεση ή πετρελαιομηχανές. Οι οποίες βασίζουν την λειτουργία τους στον κύκλο Diesel.
- Μηχανές semi – Diesel.

2. Με βάση των αριθμών των περιστροφών του στροφάλου για την ολοκλήρωση του κύκλου λειτουργίας τους έχουμε τις:

- Δίχρονες μηχανές
- Τετράχρονες μηχανές

3. Με βάση το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιούν έχουμε :

- Μηχανές βαρέως πετρελαίου (μαζούτ)
- Μηχανές ελαφρών καυσίμων (ντίζελ – βενζίνη)
- Μηχανές αερίων καυσίμων

4. Με βάση την ταχύτητα περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα έχουμε:

- Αργόστροφες μηχανές έως 350 RPM
- Μεσόστροφες μηχανές έως 1500 RPM
- Πολύστροφες μηχανές έως 5000 RPM
- Ταχύστροφες μηχανές από 5000 RPM και άνω

5. Με βάση των αριθμό των κυλίνδρων που διαθέτουν διακρίνονται:

- Μονοκύλινδρες μηχανές
- Πολυκύλινδρες μηχανές

6. Με βάση την φορά περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα έχουμε:

- Δεξιόστροφες μηχανές
- Αριστερόστροφες μηχανές
- Αναστρέψιμες μηχανές και μη αναστρέψιμες μηχανές

7. Με βάση την διάταξη των κυλίνδρων κατατάσσονται σε κινητήρες: Εν σειρά

- Τύπου (V), (W), (Δ), (H), (X)
- Αντιτιθέμενων εμβόλων
- Σταυροειδής
- Αστεροειδής
- Πολυγωνικές
- Με περιστρεφόμενο έμβολο, τύπου Wankel

8. Με βάση τον τρόπο ψύξεως των κυλίνδρων έχουμε μηχανές:

- Υδροψυκτες
- Αερόψυκτες

9. Με βάση τον τρόπο συνδέσεως εμβόλου – διωστήρα έχουμε μηχανές:

- Με βάκτρο
- Χωρίς βάκτρο

10. Με βάση τον τρόπο που εισάγεται ο εργαζόμενος αέρας μέσα στον κύλινδρο έχουμε:

- Υπερπληρούμενες μηχανές
- Μηχανές φυσικής αναπνοής

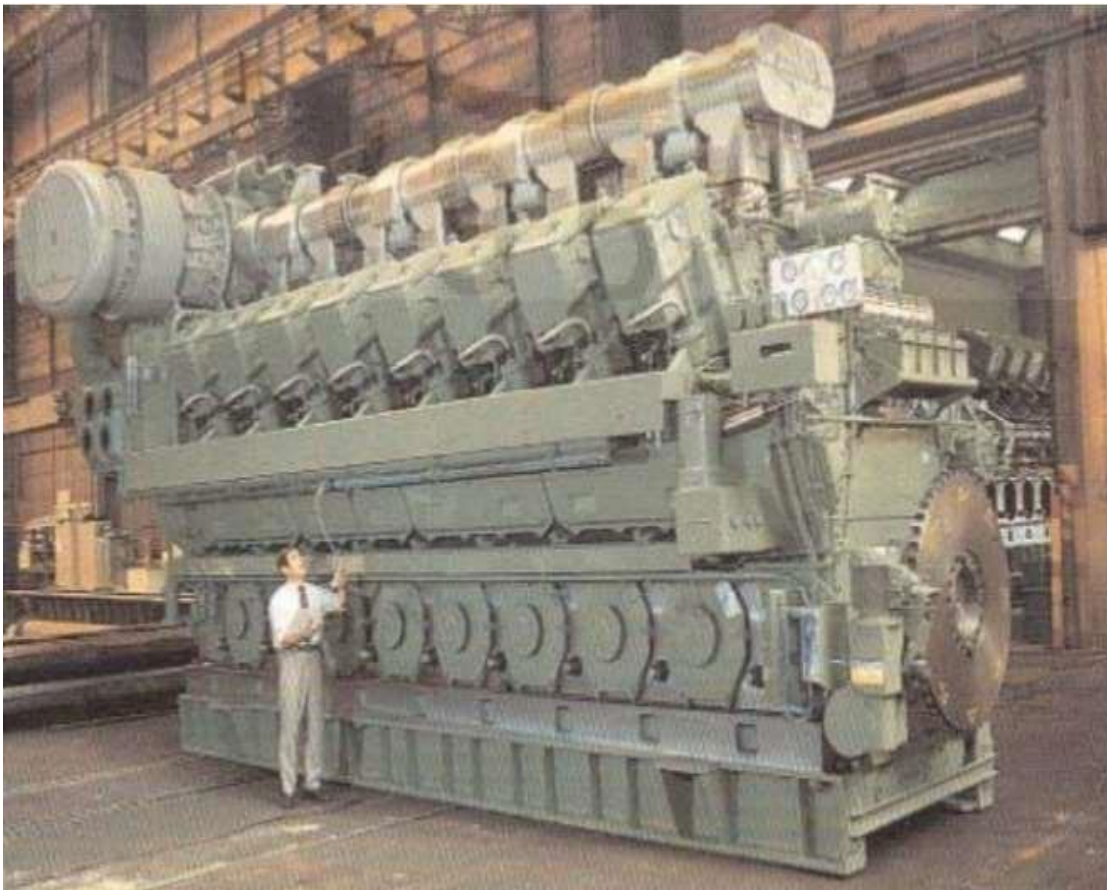
11. Με βάση τη μέθοδο με την οποία εισάγεται το καύσιμο στους βενζινοκινητήρες έχουμε μηχανές:

- Με εξαεριωτήρα
- Με αντλία εκχύσεως καυσίμου και εγχυτήρα

12. Τέλος με βάση την παραγομένη ισχύ ανά κύλινδρο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας διακρίνονται σε:

- Μηχανές μικρής ισχύος έως 20 hp.
- Μηχανές μέσης ισχύος έως 200 hp.
- Μηχανές μεγάλης ισχύος από 200 hp και άνω.

Ως ναυτικές μηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως κινητήρες Diesel (χανηλών & μεσαίων στροφών) και έχουν εφαρμογή σε όλα τα θαλάσσια μέσα. Ξεκινώντας από τα μικρά σκάφη έως τα πολύ μεγάλης χωρητικότητας εμπορικά πλοία, στα πολεμικά πλοία καθώς και στα υποβρύχια. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται είναι δίχρονες αλλά και τετράχρονες διάφορων τύπων, σχημάτων, μεγεθών και ισχύος ανάλογα με την πιο συμφέρουσα επιλογή. Τέλος το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών είναι υπερπληρούμενες. **(Εικόνα 9)**



**Εικόνα 9:** Δεκαεξακύλινδρη μεσόστροφη τετράχρονη πετρελαιομηχανή τύπου (V).

## 1.3 ΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

### 1.3.1 Περιγραφή των ναυτιλιακών καυσίμων

Τα τελευταία χρόνια σε συνδιασμό με την συνεχή μεταβολή στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα ενεργειακά προϊόντα, τα ναυτιλιακά καύσιμα βρίσκονται πάντα στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος. Ειδικά τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ενδιαφέρον για την ποιότητα των ναυτιλιακών καυσίμων, με αποκορύφωμα την έγκριση από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization- IMO), ενός χρονοδιαγράμματος προοδευτικής αλλά και ταυτόχρονα δραστικής μείωσης των εκπομπών οξειδίων του θείου από τα πλοία. Ο έλεγχος και η μέτρηση των αέριων εκπομπών από τα πλοία καλύπτεται από το Παράρτημα VI της Διεθνούς Σύμβασης για την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία (MARPOL 73/78 – Annex VI). Το συγκεκριμένο παράρτημα τέθηκε σε ισχύ τον Μάιο του 2005 και το οποίο με τον κανονισμό 14 (Regulation 14) προσπαθούσε να περιορίσει τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) μέσω της μείωσης του θείου στα ναυτιλιακά καύσιμα.

Στην πλειοψηφία τους οι ναυτικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν με διάφορα καύσιμα διαφορετικής σύστασης και ποιότητας.

Το πιο σύνηθες καύσιμο που χρησιμοποιείται στην ναυτιλία είναι το βαρύ ή υπολειμματικό πετρέλαιο (Heavy Fuel Oil ή Residual Fuel Oil ) το οποίο προέρχεται από τα κατάλοιπα της κλασματικής απόσταξης (λόγω του χαμηλότερου κόστους). Επιπλέον, χρησιμοποιούνται προϊόντα (καύσιμα) κλασματικής απόσταξης (Distillate Oil) με υψηλότερη καθαρότητα και θερμογόνο δύναμη.

#### **Heavy Fuel Oil:**

Πρόκειται για καύσιμα που απαρτίζονται από τα κατάλοιπα της κλασματικής απόσταξης και η ποιότητά τους ποικίλει ανάλογα με την διαδικασία διύλισης (διαδικασία διαχωρισμού μιγμάτων) που ακολουθείται και τη σύσταση του ακατέργαστου πετρελαίου που χρησιμοποιείται. Τα καύσιμα αυτά έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο και γενικά η καύση τους είναι αρκετά ρυπογόνος με μεγάλη εκπομπή σωματιδίων. Είναι απαραίτητο να προθερμανθεί μέχρι περίπου τους 50° βαθμούς κελσίου κ αυτό λόγω του υψηλού ιξώδους προκειμένου να μειωθεί και να είναι δυνατή η άντλησή του και περαιτέρω θέρμανσή του προκειμένου να μειωθεί κι άλλο ούτως ώστε να είναι δυνατή η έγχυσή του στον θάλαμο καύσης. Επί παραδείγματι, το καύσιμο RME 380 με ιξώδες 380 cst στους 15° C απαιτεί προθέρμανση στους 125° C προκειμένου το ιξώδες του να πέσει στα 14 cst και να είναι κατάλληλο για έγχυση. Επίσης, δεξαμενές καθίζησης και διαχωριστές για την απομάκρυνση των στερεών καταλοίπων και του νερού από

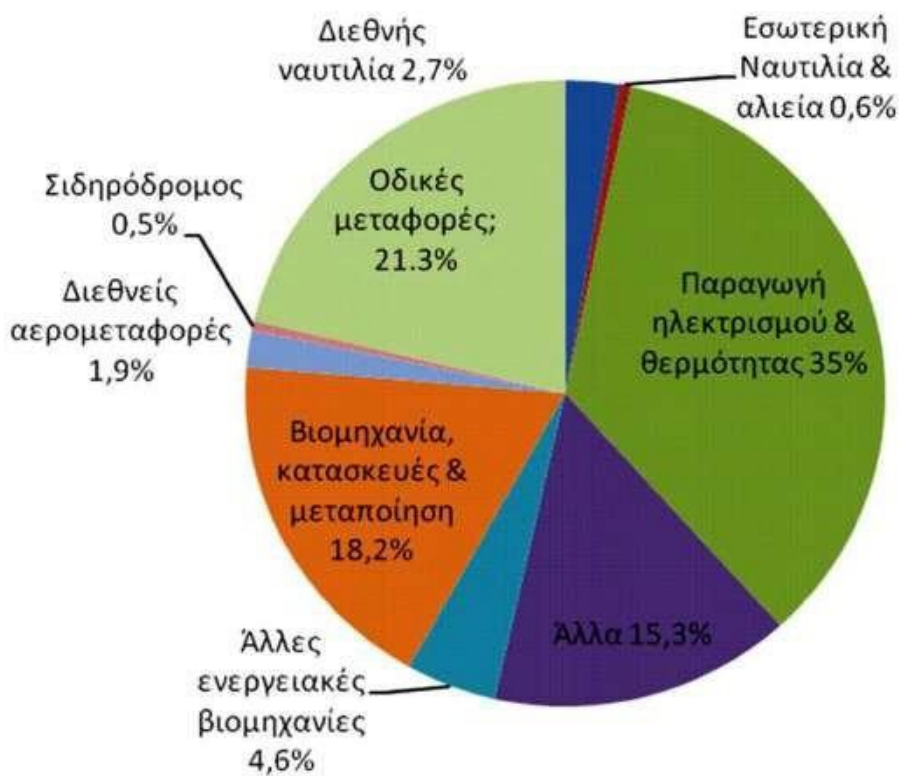
το καύσιμο πριν την κατανάλωσή του πρέπει να περιλαμβάνονται στο δίκτυο εγκατάστασης πετρελαίου στα πλοία. Μικρές προσμίξεις ανώτερων προϊόντων της κλασματικής απόσταξης με υπολειμματικό πετρέλαιο οδηγούν στα ενδιάμεσα καύσιμα (Intermediate Fuel Oil – IFO), καύσιμα με σαφώς καλύτερη ποιότητα και αποδοτικότερη καύση.

### **Distillate oil:**

Μίγμα υδρογονανθράκων προερχόμενο από την απόσταξη του αργού πετρελαίου αποτελούν τα καύσιμα αυτά. Δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία (διαχωρισμός ή προθέρμανση) πριν την καύση, ώστε να χρησιμοποιηθεί αν και οι ιδιότητές του βελτιώνονται με την προσθήκη ουσιών που σκοπό έχουν την καλύτερη απόδοση του κινητήρα. Θετικό αποτελεί η χαμηλή περιεκτικότητά τους σε θείο αλλά και σε άλλα κατάλοιπα. Γενικά, χρησιμοποιείται σε πολύ μικρή κλίμακα στην ναυτιλία κυρίως σε περιπτώσεις όπου δεν γίνεται να χρησιμοποιηθεί το βαρύ πετρέλαιο (όπως για παράδειγμα στους πολύστροφους κινητήρες Diesel). Όσο αφορά προϊόντα(καύσιμα) της κλασματικής απόσταξης- μπορούμε να τα διαχωρίσουμε σε δυο βασικές κατηγορίες: 1) Marine Distillate Oil και 2) Marine Gas Oils. Τα πρώτα περιέχουν μικρό ποσοστό υπολειμματικού πετρελαίου ενώ τα δεύτερα θεωρούνται τα καθαρότερα καύσιμα από όσα χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία.

### 1.3.2 Εκτίμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τη ναυτιλία

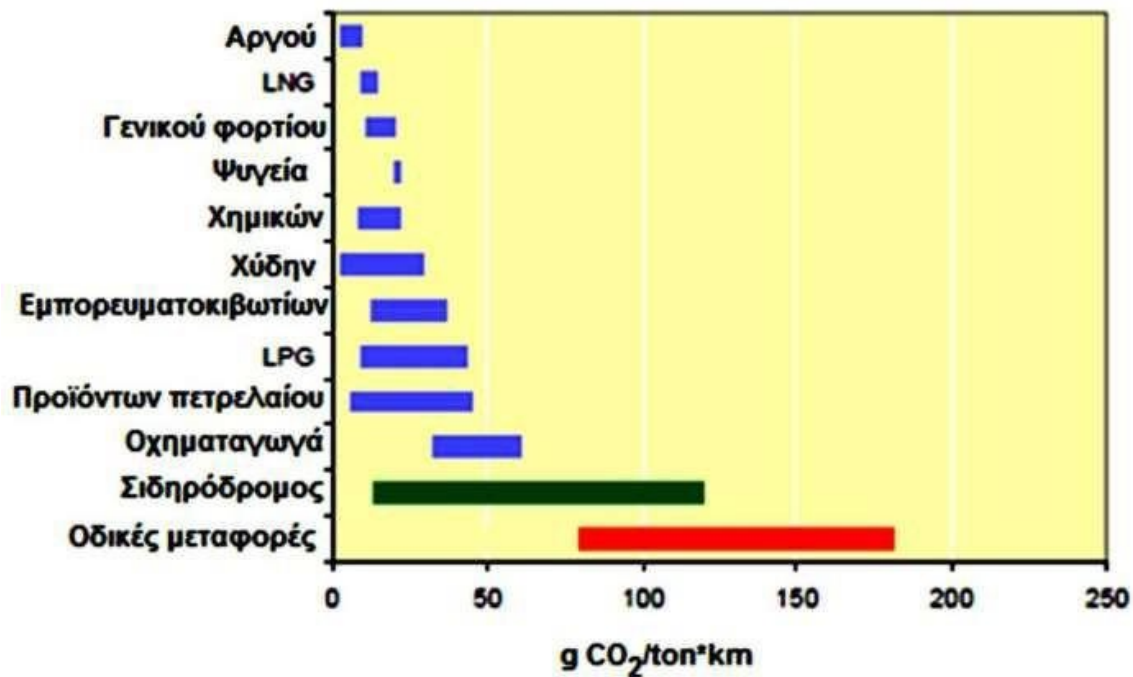
Εκτιμάται ότι οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> από τη ναυτιλία το 2007 παγκοσμίως έφτασαν τους 1.046 εκ. τόνους, ποσότητα που αντιστοιχεί στο 3,3% των παγκόσμιων εκπομπών. Από την ποσότητα αυτή, 870 εκ. ή 2,7% (**Εικόνα 2**) αποδίδονται στη διεθνή ναυτιλία και το υπόλοιπο ποσό στην εγχώρια ναυτιλία. Το CO<sub>2</sub> είναι το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου που εκπέμπεται από τη ναυτιλία σε όρους ποσοτήτων αλλά και σε όρους συνεισφοράς στην παγκόσμια θέρμανση. Η συνεισφορά των υπόλοιπων αερίων (μεθάνιο, υποξειδίο του αζώτου και χλωροφθοράνθρακες) είναι μικρότερη. Μεσοπρόθεσμα σενάρια δείχνουν ότι κατά το 2050, απουσία πολιτικών μείωσης, οι εκπομπές από τα πλοία μπορεί να έχουν αυξηθεί κατά 150-250% (συγκριτικά με το 2007), ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης της ναυτιλίας (ΙΜΟ, 2009).



**Εικόνα 10:** Παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> από διαφορετικούς οικονομικούς τομείς. (Πηγή: ΙΜΟ, 2009).



Από την άλλη πλευρά, η ναυτιλία αποτελεί έναν περιβαλλοντικά φιλικό μέσο μεταφοράς αγαθών ως προς τις επιπτώσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα μεταφορικού έργου είναι σχετικά χαμηλές και μπορεί να συγκριθούν μόνο με τις αντίστοιχες εκπομπές των σιδηροδρομικών μεταφορών (**Εικόνα 11**). Εκτός από το CO<sub>2</sub>, εκτιμάται ότι το 2007 η ναυτιλία εξέπεμψε περίπου 25 εκ. Τόνους NO<sub>x</sub>, 15 εκ. τόνους SO<sub>2</sub> και 1,8 εκ. τόνους αιωρούμενων σωματιδίων.



**Εικόνα 11:** Εκπομπές CO<sub>2</sub> με βάση το μεταφορικό έργο, από διάφορες κατηγορίες πλοίων, οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές (Πηγή: IMO, 2009).

Αναφορικά με τη συνεισφορά των υπόλοιπων ρύπων της ναυτιλίας στην παγκόσμια θέρμανση ισχύουν τα ακόλουθα: Τα ίδια τα  $\text{NO}_x$  δεν απορροφούν ούτε ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, είναι δηλαδή κλιματικά ουδέτερα. Όμως συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις στην κατώτερη ατμόσφαιρα (φωτοχημικό νέφος) που έχουν ως συνέπεια την παραγωγή όζοντος ( $\text{O}_3$ ), το οποίο αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου. Από την άλλη πλευρά, τα  $\text{NO}_x$  συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις διάσπασης του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ), το οποίο αποτελεί ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου. Οι δύο αυτές δράσεις είναι παρόμοιου μεγέθους και αλληλοεξουδετερώνονται. Συνεπώς, η καθαρή έμμεση επίδραση των  $\text{NO}_x$  στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι αμελητέα. Τα οξειδία του θείου στην ατμόσφαιρα σχηματίζουν σωματίδια θειικών, τα οποία έχουν την ιδιότητα να σκεδάζουν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, περιορίζοντας το ποσοστό που φτάνει στην επιφάνεια της γης (Voiland, 2010). Συνεπώς μειώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου ψύχοντας την ατμόσφαιρα. Επιπλέον, έχουν και μια έμμεση επίδραση, που και αυτή προκαλεί ψύξη στην ατμόσφαιρα (Voiland, 2010): Αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα μιας ρυπασμένης περιοχής γίνονται πυρήνες συμπύκνωσης των υδρατμών και συντελούν στη δημιουργία νεφών. Στα νέφη αυτά, οι σταγόνες της υγρασίας έχουν μικρότερο διάμετρο σε σχέση με μια μη ρυπασμένη περιοχή. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από τα σύννεφα, δηλαδή αυξάνεται η ανακλαστικότητα των σύννεφων. Η έμμεση αυτή επίδραση των  $\text{SO}_x$  δεν έχει ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια, όμως υπάρχουν εκτιμήσεις ότι είναι σημαντική. **(Πίνακας 1)**

Επιπλέον, η ναυτιλία εκπέμπει αιθάλη ως μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων. Η αιθάλη, όταν βρίσκεται στην ατμόσφαιρα, λόγω του μαύρου χρώματός της, ενισχύει το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αυξάνοντας την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας ενώ παράλληλα σκιάζει και ψύχει την επιφάνεια της γης που βρίσκεται από κάτω. Όταν η αιθάλη πέσει σε ανοιχτόχρωμες περιοχές του πλανήτη (π.χ. Αρκτική) μειώνει την ανακλαστικότητά τους, συντελώντας στη θέρμανση (Voiland, 2010). Η καθαρή επίδραση του συνόλου των εκπομπών της ναυτιλίας ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , PM) στο κλίμα σήμερα είναι ότι ψύχουν την ατμόσφαιρα (Fuglestvedt et al., 2009). Για τον λόγο αυτό υπάρχουν φωνές που υποστηρίζουν ότι δεν είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα περιορισμού των εκπομπών  $\text{CO}_2$  αλλά και των υπολοίπων ρύπων από τη ναυτιλία ή τουλάχιστον τα μέτρα αυτά δεν πρέπει να είναι πολύ αυστηρά.

Οι υποστηρικτές της άποψης αυτής θα πρέπει πάντως να συνεκτιμήσουν ότι το  $\text{SO}_2$  και το  $\text{CO}_2$  λειτουργούν σε πολύ διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Τα σωματίδια θειικών ( $\text{SO}_4$ ) παραμένουν στην ατμόσφαιρα για λίγες μέρες (διασπώνται γρήγορα). Το  $\text{CO}_2$  παραμένει στην ατμόσφαιρα για 5 έως 200 έτη (είναι σχετικά αδρανές). Συνεπώς, οι επιπτώσεις στο κλίμα από ένα μόριο  $\text{CO}_2$  που εκπέμφθηκε σήμερα θα συνεχίσουν να υφίστανται για πολλαπλάσιο χρόνο σε σχέση με την ψύξη που θα προκαλέσει έμμεσα ένα μόριο  $\text{SO}_2$ . Αναμένεται λοιπόν ότι η θέρμανση από το  $\text{CO}_2$  θα επικρατήσει σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα (Fuglestvedt et al.,

2009). Η εκτίμηση για το πότε θα συμβεί η αλλαγή (αναφέρονται εκτιμήσεις μεταξύ 150 και 1.000 έτη) ενέχει μεγάλη αβεβαιότητα, λόγω της αβεβαιότητας στην εκτίμηση της έμμεσης συνεισφορά των σωματιδίων θεικών και των υπολοίπων αερίων κ.λπ. (Fuglestvedt et al., 2009).

Επιπλέον, όπως ήδη αναφέρθηκε, τα NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> και PM από τη ναυτιλία ενέχουν σοβαρούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, ιδιαίτερα σε όσους κατοικούν σε περιοχές έντονης ναυτιλιακής δραστηριότητας και ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές ή λιμάνια. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω και την αρχή της προφύλαξης, που ορίζει ότι όταν απειλείται σοβαρή βλάβη για το περιβάλλον, δεν θα πρέπει να καθυστερεί η ανάληψη δράσης για την αντιμετώπισή της ακόμα και αν δεν υπάρχει αδιάψευστη επιστημονική βεβαιότητα για το θέμα, η προσπάθεια του IMO για τη μείωση όλων των ρύπων της ναυτιλίας μπορεί να θεωρηθεί βάσιμη, τουλάχιστον έως ότου υπάρξουν επαρκή επιστημονικά δεδομένα που να υποστηρίζουν το αντίθετο.

**Πίνακας 1:** Η συνεισφορά της ναυτιλίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. (Πηγή: IMO, 2009).

Ρύπος	Εκπεμπόμενη ποσότητα από τη ναυτιλία (εκ. τόνοι το 2007)*	Καθαρή επίδραση στην παγκόσμια θέρμανση (φαινόμενο θερμοκηπίου)
CO <sub>2</sub>	1046	Ενίσχυση
NO <sub>x</sub>	25	Αμελητέα
SO <sub>x</sub>	15	Μείωση (τα σωματίδια θεικών)
PM	1,8	Ενίσχυση (η αιθάλη)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

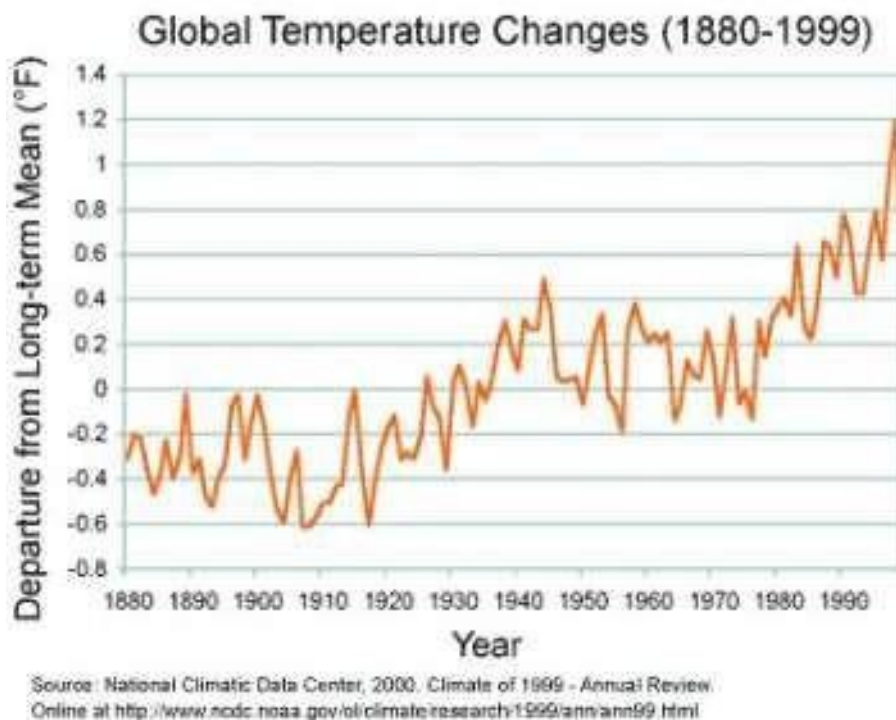
#### **2.1.1 Περιβαλλοντική ρύπανση και η αναγκαιότητα για μετάβαση σε νέες τεχνολογίες και εναλλακτικές μορφές καυσίμων**

Η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι υπεύθυνη για ένα σημαντικό ποσοστό του παγκόσμιου προβλήματος της κλιματικής αλλαγής. Η ρύπανση και η προσβολή του θαλάσσιου χώρου χαρακτηρίζεται από τη σκόπιμη απόρριψη των άχρηστων υλικών από χερσαίες διαδικασίες, τη διοχέτευση αστικών και βιομηχανικών λυμάτων και από τη λειτουργική ή συμπτωματική λόγω ατυχήματος ρύπανση από πλοία. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί πως λαμβάνοντας υπόψη ότι οι θαλάσσιες μεταφορές καλύπτουν σχεδόν το 90% της παγκόσμιας διακίνησης φορτίων έναντι του 10% των ποσοτήτων που διακινούνται με τα αεροπορικά, οδικά, σιδηροδρομικά μέσα μεταφοράς και τους αγωγούς, η ναυτιλία αποτελεί την πιο φιλική προς το περιβάλλον δραστηριότητα μεταφοράς προϊόντων και αγαθών.

Παρότι όμως το πλοίο είναι το φιλικότερο προς το περιβάλλον μέσο μεταφοράς αγαθών, είναι γεγονός πως συμβάλλει με πολλούς τρόπους στη ρύπανση του θαλάσσιου, του ατμοσφαιρικού και του χερσαίου περιβάλλοντος. Τα πλοία επιβαρύνουν το θαλάσσιο περιβάλλον με τοξικά απόβλητα από τα υφαλοχρώματα των πλοίων και με μικροοργανισμούς που μεταφέρονται μέσω του θαλάσσιου έρματος και της γάστρας στο νερό. Πρόσθετοι επιβαρυντικοί παράγοντες είναι το νερό που χρησιμοποιείται από το πλήρωμα για δραστηριότητες όπως το πλύσιμο σκευών, τα πλυντήρια για την ατομική καθαριότητα των πληρωμάτων, καθώς και τα σκουπίδια που προέρχονται από τη διαβίωση των πληρωμάτων στα πλοία και απορρίπτονται στη θάλασσα.

Οι χερσαίες περιοχές, επίσης, επιβαρύνονται με πολλούς τρόπους από τις θαλάσσιες μεταφορές. Τα απορρίμματα από τα πλοία, αμμοβολές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια επισκευών, υπολείμματα λάσπης από δεξαμενές που δεν έχουν υποστεί καμία επεξεργασία, αλλά και κομμάτια χάλυβα τα οποία προέκυψαν από τη διάλυση πλοίων ή ελασματοουργικές εργασίες.

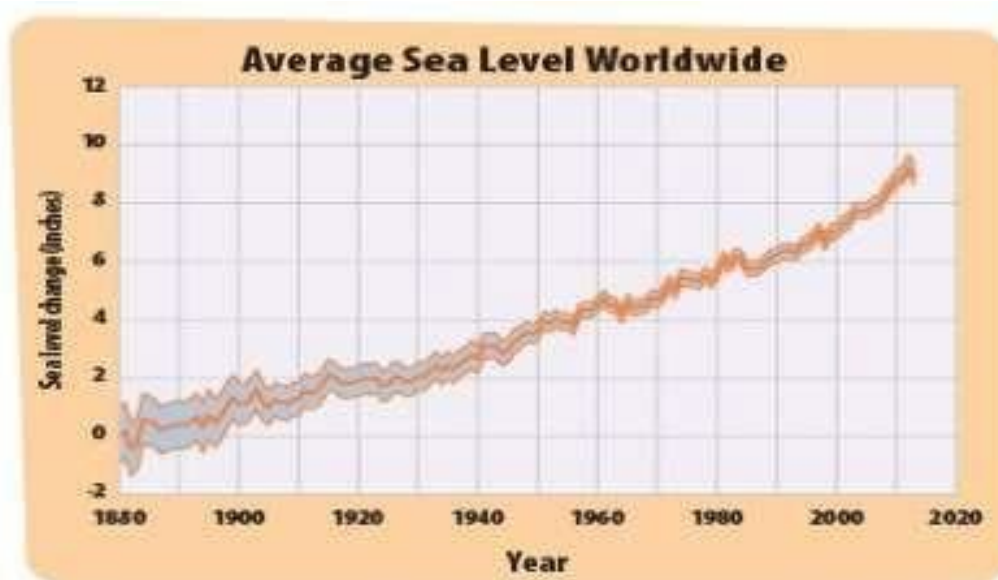
Στη ρύπανση της ατμόσφαιρας τα πλοία συντελούν με διάφορους αέριους ρύπους, συμπεριλαμβανομένου του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), της αιθάλης (C), των οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) ή του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και του υποξειδίου του αζώτου (NO). Οι ρύποι αυτοί συμβάλλουν στην παγκόσμια αλλαγή του κλίματος είτε άμεσα δρώντας ως μέσο του εγκλωβισμού της θερμότητας στην ατμόσφαιρα είτε έμμεσα βοηθώντας στη δημιουργία επιπλέον αερίων του θερμοκηπίου. Μια άλλη κατηγορία είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (PM10), τα αέρια που σχετίζονται με την τρύπα του όζοντος (NO<sub>x</sub> και VOCs – Volatile Organic Compounds) και τέλος αέριοι ρύποι που προκαλούν όξινη βροχή, SO<sub>x</sub> (οξειδία του θείου), NH<sub>3</sub> (αμμωνία) και NO<sub>x</sub>, τα οποία επίσης προκαλούν όξινη βροχή.



**Εικόνα 12:** Μεταβολή στη μέση τιμή της θερμοκρασίας της Γης. (Πηγή: National Climate Data Center. Climate of 1999 – Annual Review).

Ένα κομβικής σημασίας ζήτημα που επίσης απασχολεί τη ναυτιλιακή κοινότητα είναι το CO<sub>2</sub> που προέρχεται από τη ναυτιλία. Η κλιματική αλλαγή (**Εικόνα 12**) είναι ένα θέμα που απασχολεί έντονα την επιστημονική κοινότητα και θα έχει αδιαμφισβήτητα καθοριστικές συνέπειες στο μέλλον της ανθρωπότητας. Είναι πλέον γνωστό πως η αλλαγή του κλίματος είναι ένα φαινόμενο, το οποίο αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια και αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα παγκόσμιας κλίμακας, λαμβάνοντας μια σημαντική θέση στο προσκήνιο, λόγω των αρνητικών συνεπειών του. Ξεκινώντας από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης η πρόοδος της ανθρωπότητας μέσω της τεχνολογίας και της επιστήμης έφερε τεράστιες αλλαγές σε όλες της πτυχές της βιομηχανίας αλλά και της κοινωνίας η οποία έχει

αφομοιώσει τα τεχνολογικά επιτεύγματα κάνοντας τα αναπόσπαστο μέρος της καθημερινότητας της. Πέρα από τις αναμφισβήτητες ωφέλειες είχε και αρνητικές συνέπειες και μια από είναι η εξάντληση των φυσικών πόρων και η ρύπανση του περιβάλλοντος, η οποία απειλεί άμεσα το κλίμα του πλανήτη.



**Εικόνα 13:** Η αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας. (Πηγή: EPA's Climate Change Indicators.

Σύμφωνα με έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής ήδη βιώνονται σε όλες τις ηπείρους και σε όλους τους ωκεανούς. Η παγκόσμια κοινότητα, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι απροετοίμαστη για τους κινδύνους από την αλλαγή του κλίματος. Η έκθεση καταλήγει στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν οι δυνατότητες να ανταποκριθεί ο κόσμος σε αυτούς τους κινδύνους, αν και θα είναι δύσκολο να είναι διαχειρίσιμη η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη λόγω των εκπομπών. Μια αύξηση μεταξύ 2 με 4 βαθμούς Κελσίου θα οδηγήσει στην ερημοποίηση πολλών περιοχών και στην αύξηση της ξηρασίας, ενώ σε άλλες περιοχές θα υπάρξουν έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες, με αποτέλεσμα τη διάβρωση του εδάφους και την παράλληλη εμφάνιση καταστροφικών τυφώνων. Στην ακραία περίπτωση αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας πάνω από 4 βαθμούς Κελσίου, θα υπάρξουν καταστροφικές συνέπειες στα περιβαλλοντικά οικοσυστήματα, στις διεθνείς σχέσεις και την παγκόσμια οικονομία.

Σε πολλές διαδρομές η αύξηση των καταιγίδων θα κάνει μεγαλύτερο το κόστος της ναυτιλίας, μιας και θα την αναγκάσει είτε να λάβει μέτρα πρόσθετης ασφάλειας είτε να οδηγήσει στην υιοθέτηση μεγαλύτερων διαδρομών. Αν οι καταιγίδες διαταράσσουν τις εφοδιαστικές αλυσίδες, θα αυξηθεί το κόστος μεταφοράς ή θα αναζητηθούν νέα δρομολόγια. Επίσης, οι αυξημένες καταιγίδες μπορεί να κάνουν πιο συχνές τις καθυστερήσεις λόγω κακών καιρικών συνθηκών,

ενώ σίγουρα θα αυξήσουν το κόστος συντήρησης των πλοίων και των λιμανιών.

Ένα ακόμη σκέλος της ναυτιλίας που θα επηρεαστεί από την κλιματική αλλαγή, τις υψηλότερες θερμοκρασίες, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας (**Εικόνα 13**) και τις εντονότερες και αυξημένες καταιγίδες είναι, φυσικά, τα λιμάνια. Γι' αυτόν τον λόγο είναι απαραίτητη η κατάλληλη κατάρτιση του προσωπικού των λιμένων, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία προσαρμογής. Περαιτέρω, η οξύνιση των ωκεανών από τις αυξανόμενες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα έχει ως αποτέλεσμα να τίθενται σε κίνδυνο οι κοραλλιογενείς ύφαλοι και άλλοι οργανισμοί που παράγουν το ανθρακικό ασβέστιο των κοχυλιών. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε κατάρρευση πολλών σημαντικών τροφικών αλυσίδων, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων από τις οποίες εξαρτώνται οι άνθρωποι. Τα θαλάσσια οικοσυστήματα και η κυκλοφορία των ωκεανών διαταράσσονται από το λιώσιμο των θαλάσσιων πάγων και την αύξηση της στάθμης της θάλασσας, που προκαλεί η συνεχιζόμενη αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών.

Η ανθρωπότητα, λοιπόν, βρίσκεται αντιμέτωπη με μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της στην παγκόσμια ιστορία, η οποία θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό το μέλλον της. Η επιστημονική κοινότητα, αντιλαμβανόμενη την κλιματική αλλαγή που συντελείται, πιέζει διαχρονικά τις κυβερνήσεις και τους πολιτικούς αρχηγούς να λάβουν μέτρα που θα αντιμετωπίσουν το πρόβλημα.

## 2.1.2 Περιβαλλοντική ρύπανση κατά την κίνηση πλοίου – μια προσέγγιση υπολογισμού

Στην ενότητα αυτή περιγράφουμε μια αναλυτική διαδικασία υπολογισμού των εκπομπών ρύπων κατά την κίνηση πλοίου με συμβατικό κινητήρα (όχι μειωμένων ρύπων). Αξίζει αν σημειωθεί ότι το διοξείδιο του άνθρακα, αν και αποτελεί το κύριο αέριο θερμοκηπίου, δε θεωρείται ρύπος και δεν υπολογίζεται με την ακόλουθη μεθοδολογία. Ωστόσο, αφού ο άνθρακας είναι το κύριο συστατικό όλων των συμβατικών καυσίμων, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, το κύριο προϊόν της καύσης τους, μπορεί να θεωρηθεί σε πρώτη προσέγγιση σαν γραμμική συνάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου (Trozzi, 2010).

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την εκτίμηση των εκπομπών ρύπων, είτε ξεκινώντας από την κατανάλωση καυσίμου, είτε ξεκινώντας από την ισχύ της μηχανής του πλοίου. Αν η κατανάλωση καυσίμου για κάθε στάδιο του ταξιδιού είναι γνωστή, οι εκπομπές ενός ρυπαντή  $i$  για ένα πλήρες ταξίδι υπολογίζονται σαν:

$$E_{trip,i,j,m} = \sum_p FC_{j,m,p} \chi EF_{i,j,m,p}$$

Όπου:

$E_{trip}$ : οι εκπομπές σε τόνους για ένα πλήρες ταξίδι

FC: η κατανάλωση καυσίμου σε τόνους

EF: ο συντελεστής εκπομπής (σε κιλά/τόνο)

i: το είδος ρυπαντή (NO<sub>x</sub>, VOC (πτητικά οργανικά), PM (μικροσωματίδια), CO, ...)

j: το είδος της μηχανής (ντηζελ μικρής μέσης ή μεγάλης ταχύτητας, αεριοστρόβλος, ατμοστρόβιλος)

m: το είδος του καυσίμου (fuel oil, ναυτικό ντήζελ, βενζίνη)

p: η κάθε φάση του ταξιδιού (κυρίως ταξίδι, ελλιμενισμός, μανούβρες)

Όταν η κατανάλωση καυσίμου για κάθε φάση του ταξιδιού δεν είναι γνωστή, μια διαφορετική μεθοδολογία μπορεί να οδηγήσει στον υπολογισμό των εκπομπών, με βάση την εγκατεστημένη ισχύ και το χρόνο που δαπανάται στις διάφορες φάσεις του ταξιδιού, και έτσι οι εκπομπές υπολογίζονται με βάση τη γνώση της εγκατεστημένης κύριας και βοηθητικής μονάδας ισχύος, τον παράγοντα φορτίου για κάθε μονάδα ισχύος και το χρόνο σε κάθε φάση ταξιδιού ως εξής:

$$E_{trip,i,j,m} = \sum_p \left[ T_p \sum_e (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p}) \right]$$

Όπου οι νέοι παράγοντες είναι:

LF: ο παράγοντας φόρτου (%) κάθε μηχανής

EF: ο συντελεστής εκπομπής (σε κιλά/kW)

P: η ονομαστική ισχύς της μηχανής σε kW

T: ο χρόνος σε ώρες

e: η κατηγορία μηχανής (κύρια, βοηθητική)

Οι συντελεστές εκπομπής EF που εμφανίζονται στις παραπάνω σχέσεις έχουν υπολογιστεί για διάφορους συνδυασμούς μηχανής, καυσίμου και ρύπου, και ενδεικτικά φαίνονται (για μερικά στάδια και μερικούς ρύπους) στους παρακάτω **πίνακες 2-3**, και για τις δύο μεθοδολογίες:



**Πίνακας 2:** Ο συντελεστής εκπομπής για τους κύριους ρύπους σε σχέση με την κατανάλωση καυσίμου.

Engine	Phase	Engine type	Fuel type	NOx EF 2000 (kg/tonne)	NOx EF 2005 (kg/tonne)	NMVOC EF (kg/tonne)	TSP PM <sub>10</sub> PM <sub>2,5</sub> EF (kg/tonne)
Main	Cruise	Gas turbine	BFO	20.0	19.3	0.3	0.3
			MDO/MGO	19.7	19.0	0.3	0.0
		High-speed diesel	BFO	59.6	57.7	0.9	3.8
			MDO/MGO	59.1	57.1	1.0	1.5
		Medium-speed diesel	BFO	65.7	63.4	2.3	3.8
			MDO/MGO	65.0	63.1	2.4	1.5
		Slow-speed diesel	BFO	92.8	89.7	3.0	8.7
	MDO/MGO		91.9	88.6	3.2	1.6	
	Manoeuvring Hotelling	Steam turbine	BFO	6.9	6.6	0.3	2.6
			MDO/MGO	6.9	6.6	0.3	1.0
		Gas turbine	BFO	9.2	8.9	1.5	4.5
			MDO/MGO	9.1	8.8	1.5	1.6
		High-speed diesel	BFO	43.6	39.7	2.5	10.3
			MDO/MGO	43.0	44.3	2.6	4.0
Medium-speed diesel		BFO	47.9	46.2	6.3	10.3	
	MDO/MGO	47.5	45.7	6.6	4.0		
Slow-speed diesel	BFO	67.4	65.1	8.2	11.2		
	MDO/MGO	66.7	64.2	8.6	4.4		
Auxiliary	Cruise Manoeuvring Hotelling	High-speed diesel	BFO	51.1	49.4	1.7	3.5
			MDO/MGO	50.2	48.6	1.8	1.4
		Medium-speed diesel	BFO	64.8	62.5	1.7	3.5
	MDO/MGO		64.1	62.0	1.8	1.4	

BFO –Bunker Fuel Oil, MDO –Marine Diesel Oil, MGO –Marine Gas Oil

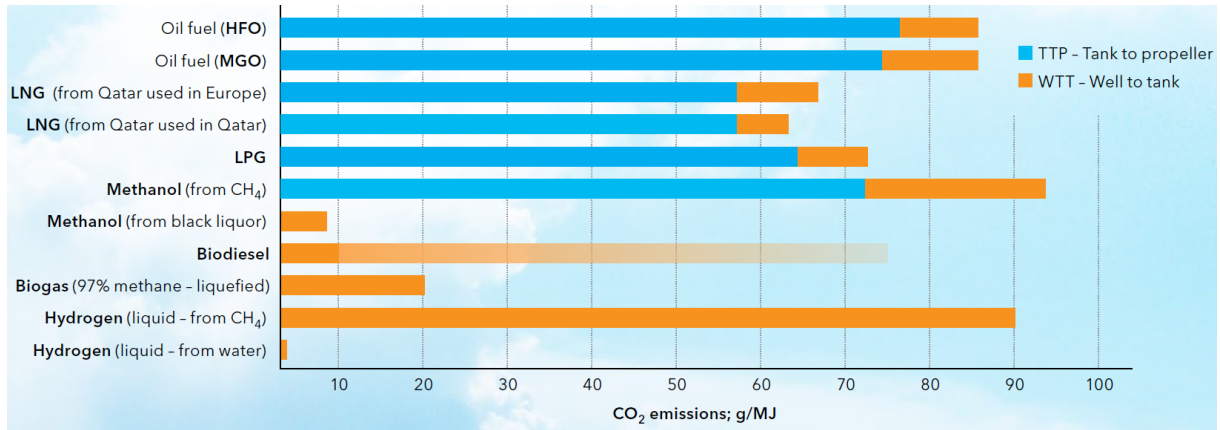
**Πίνακας 3:** Ο συντελεστής εκπομπής για τους κύριους ρύπους σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ.

Engine	Phase	Engine type	Fuel type	NOx EF 2000 (g/kWh)	NOx EF 2005 (g/kWh)	NMVOC EF (g/kWh)	TSP PM <sub>10</sub> PM <sub>2,5</sub> EF (g/kWh)	Specific fuel consumption (g fuel/kWh)	
Main	Cruise	Gas turbine	BFO	6.1	5.9	0.1	0.1	305.0	
			MDO/MGO	5.7	5.5	0.1	0.0	290.0	
		High-speed diesel	BFO	12.7	12.3	0.2	0.8	213.0	
			MDO/MGO	12.0	11.6	0.2	0.3	203.0	
		Medium-speed diesel	BFO	14.0	13.5	0.5	0.8	213.0	
			MDO/MGO	13.2	12.8	0.5	0.3	203.0	
		Slow-speed diesel	BFO	18.1	17.5	0.6	1.7	195.0	
			MDO/MGO	17.0	16.4	0.6	0.3	185.0	
		Steam turbine	BFO	2.1	2.0	0.1	0.8	305.0	
			MDO/MGO	2.0	1.9	0.1	0.3	290.0	
		Manoeuvring Hotelling	Gas turbine	BFO	3.1	3.0	0.5	1.5	336.0
				MDO/MGO	2.9	2.8	0.5	0.5	319.0
			High-speed diesel	BFO	10.2	9.3	0.6	2.4	234.0
				MDO/MGO	9.6	9.9	0.6	0.9	223.0
	Medium-speed diesel	BFO	11.2	10.8	1.5	2.4	234.0		
		MDO/MGO	10.6	10.2	1.5	0.9	223.0		
	Slow-speed diesel	BFO	14.5	14.0	1.8	2.4	215.0		
		MDO/MGO	13.6	13.1	1.8	0.9	204.0		
Steam turbine	BFO	1.7	1.6	0.3	2.4	336.0			
	MDO/MGO	1.6	1.6	0.3	0.9	319.0			
Auxiliary	Cruise Manoeuvring Hotelling	High-speed diesel	BFO	11.6	11.2	0.4	0.8	227.0	
			MDO/MGO	10.9	10.5	0.4	0.3	217.0	
		Medium-speed diesel	BFO	14.7	14.2	0.4	0.8	227.0	
			MDO/MGO	13.9	13.5	0.4	0.3	217.0	

BFO –Bunker Fuel Oil, MDO –Marine Diesel Oil, MGO –Marine Gas Oil

Στον κάθε πίνακα δίνονται δύο τιμές για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, που αντικατοπτρίζουν τη σημαντική βελτίωση των κινητήρων μετά το 2005.

Τέλος, δίνουμε μια συνοπτική εικόνα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για διάφορα συμβατικά και νεωτερικά καύσιμα, με τις υπάρχουσες τεχνικές παραγωγής, στην **Εικόνα 14**.



**Εικόνα 14:** Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για διάφορα καύσιμα. Τα λεγόμενα "καθαρά" καύσιμα, μπορεί να έχουν σημαντική εκπομπή κατά την παραγωγή (πορτοκαλί) και όχι την καύση τους (μπλε).

## 2.2 ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ & ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

### 2.2.1 Ιστορική αναδρομή

Ο IMO (international Maritime Organization – Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας) **(Εικόνα 15)** αποτελεί το σημαντικότερο όργανο παγκοσμίως και θέτει το ρυθμιστικό πλαίσιο για τη ναυτιλία. Είναι οργανισμός ο οποίος ανήκει στα Ηνωμένα Έθνη και έχει ως έδρα το Λονδίνο. Προωθεί κανονισμούς και πολιτικές σχετικά με την πρόληψη της ρύπανσης, την ασφάλεια ανθρώπων και αγαθών στις θαλάσσιες μεταφορές, την ασφάλεια ναυσιπλοΐας και την ποιότητα των πληρωμάτων των πλοίων.



*Εικόνα 15: Το λογότυπο του IMO (Πηγή: Wikipedia.org).*

Λειτουργεί μέσω ενός αριθμού εξειδικευμένων επιτροπών και υποεπιτροπών, καθεμιά από τις οποίες αποτελείται από αντιπροσώπους των κρατών μελών. Το 1973 ιδρύθηκε η επιτροπή για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee – MEPC) και έχει ως αρμοδιότητα τον συντονισμό των δραστηριοτήτων για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τη ναυτιλία. Στις μέρες μας πάνω από σαράντα (40) διακυβερνητικές και περίπου εξήντα (60) μη κυβερνητικές οργανώσεις παρακολουθούν τις εργασίες της επιτροπής έχοντας συμβουλευτικό ρόλο χωρίς δικαίωμα ψήφου.

Μετά το τέλος του 2ου παγκοσμίου πολέμου, η ραγδαία ανάπτυξη της οικονομίας απαιτούσε κατανάλωση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας. Το 1948 τα Ηνωμένα Έθνη στην προσπάθεια τους να θέσουν κάποιους κανόνες στον άκρατο ανταγωνισμό συγκάλεσαν μια διάσκεψη στη Γενεύη με θέμα την διεθνή ναυτιλία. Μία εκ των αποφάσεων της διάσκεψης αυτής, ήταν και η ίδρυση του IMCO (Intergovernmental Maritime Consultative Organization) που όπως αποδείχτηκε με το πέρασμα τον χρόνων ,αποτέλεσε πρόδρομο του IMO (International Maritime Organization). Πιο συγκεκριμένα, ο IMCO μετονομάστηκε σε IMO το 1982. Το αποτέλεσμα αυτό της διάσκεψης δεν ήταν αρεστό στις παραδοσιακές ναυτιλιακές χώρες, όπως η Μεγάλη Βρετανία, καθώς έβλεπαν με ιδιαίτερη καχυποψία τις αρμοδιότητες ενός νέου οργανισμού στο «μονοπώλιο» το οποίο είχε παγιωθεί αιώνες πριν. Η καχυποψία αυτή επέφερε την καθυστέρηση επικύρωσης της ιδρυτικής σύμβασης η οποία και συνέβη μόλις το 1958, δέκα (10) χρόνια δηλαδή μετά την διάσκεψη της Γενεύης. Η διάσκεψη της Στοκχόλμης θεωρείται ως η θεμέλιος διάσκεψη των βάσεων της περιβαλλοντικής πολιτικής που ακολουθείται σε διεθνές επίπεδο έως σήμερα. Για την υλοποίηση της περιβαλλοντικής πολιτικής, κατά τη δεκαετία του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά κανονισμοί που έθεταν όρια στις εκπομπές των ρύπων και επέβαλλαν πρότυπα ποιότητας περιβάλλοντος, διεργασιών και τεχνολογιών.

## **2.2.2 Τρόπος λειτουργίας του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού**

Οι διεθνείς συμβάσεις αποτελούν σημαντική πηγή δικαίου για την εφαρμογή του Δικαίου της Θάλασσας. Οι διεθνείς συμβάσεις και άλλες πολυμερείς πράξεις (κώδικες, πρωτόκολλα, συστάσεις, οδηγίες), δημιουργούν στα κράτη διεθνείς συμβατικές υποχρεώσεις. Οι κυβερνήσεις οι οποίες τις κυρώνουν, συμφωνούν να εναρμονίσουν τους νόμους τους με τις διατάξεις αυτών. Όσον αφορά τις ναυτιλιακές συμβάσεις, αυτές έχουν δημιουργηθεί υπό την αιγίδα του IMO. Ο σκοπός του IMO είναι να καθιερώσει πρότυπα (standards) τα οποία να γίνουν αποδεκτά από όσο το δυνατό περισσότερες χώρες και να μπορούν να εφαρμοστούν, έτσι ώστε να εξαλειφθούν οι διαφορές κατά την εφαρμογή τους από τα κράτη.

Ο IMO έχει υιοθετήσει πολυμερείς συμβάσεις σε θέματα που αφορούν ιδίως την ασφάλεια των πλοίων και την πρόληψη της ρύπανσης από πλοία. Ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας με την οποία δημιουργείται και τίθεται σε ισχύ μια σύμβαση.

### **2.2.3 Δημιουργία και ισχύς μιας σύμβασης από τον IMO**

Πρόταση για δημιουργία μιας διεθνούς συμφωνίας μπορεί να γίνει σε ένα από τα όργανα του IMO. Η επίσημη αποδοχή γίνεται είτε από την συνέλευση είτε από το συμβούλιο. Ένα σχέδιο της συμφωνίας (draft of the treaty) προετοιμάζεται τότε σε μία από τις κύριες επιτροπές ή υποεπιτροπές του IMO. Όταν το σχέδιο γίνει αποδεκτό από την ενδιαφερόμενη επιτροπή (Επιτροπή Ναυτιλιακής Ασφάλειας, Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος ή την Νομική Επιτροπή), τότε υποβάλλεται σε μια διεθνή διπλωματική συνδιάσκεψη (International Diplomatic Conference) στην οποία προσκαλούνται όλα τα μέλη του ΟΗΕ και οι εξειδικευμένες οργανώσεις του (agencies). Μία διπλωματική συνδιάσκεψη του IMO διαρκεί δύο έως τέσσερις εβδομάδες, στο τέλος της οποίας υιοθετείται επισήμως μια τελική σύμβαση ή άλλη συμφωνία (ISM CODE IMO).

Μετά την υιοθέτηση της σύμβασης, το βάρος των ενεργειών μετατίθεται στις Κυβερνήσεις. Ο χρόνος που απαιτείται για να τεθεί μια σύμβαση σε ισχύ, εξαρτάται από τον χρόνο που χρειάζονται οι κυβερνήσεις για να κυρώσουν την σύμβαση. Η συγκατάθεση των Κρατών μπορεί να γίνει δια της υπογραφής (signature), κύρωσης (ratification), αποδοχής (acceptance), έγκρισης (approval) ή της προσχώρησης (accession). Τούτο εξαρτάται από την επιθυμία των ενεχομένων κρατών. Αυτή η διαδικασία γενικά αναφέρεται ως «κύρωση» και σύμφωνα με το Σύνταγμα, μια σύμβαση, μετά την κύρωση της αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της εθνικής νομοθεσίας του κράτους και υπερισχύει από κάθε άλλη διάταξη νόμου που βρίσκεται σε σύγκρουση με αυτή. Οι συμβάσεις του IMO τίθενται σε ισχύ ύστερα από την κύρωση τους από ένα συγκεκριμένο αριθμό κρατών. Οι περισσότερες από τις συμβάσεις του IMO για να τεθούν σε ισχύ απαιτούν, πέραν από τον απαιτούμενο αριθμό κρατών, να έχουν συνολικά κάποιο ποσοστό της διεθνούς χωρητικότητας. Για παράδειγμα η σύμβαση MARPOL 73/78 αναφέρει ότι θα τεθεί σε ισχύ όταν θα:

- έχουν διέλθει δώδεκα μήνες μετά την ημερομηνία επικύρωσης από το 15<sup>ο</sup> κράτος και,
- θα πρέπει να κατέχονται από τα κράτη που την επικύρωσαν τουλάχιστον το 50% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου σε ολική χωρητικότητα» (MARPOL 1973/78)

Μια κυβέρνηση που κυρώνει μια σύμβαση θα πρέπει να διασφαλίσει ότι το εθνικό της δίκαιο είναι σύμφωνο με τις διατάξεις της σύμβασης. Τούτο συνήθως συνεπάγεται κάποιου είδους εσωτερικής νομοθετικής ρύθμισης. Όταν δε οι απαιτήσεις για να τεθεί η σύμβαση σε ισχύ έχουν πληρωθεί, ακολουθεί μια «περίοδος χάριτος». Αυτή η περίοδος ποικίλλει, από λίγους μήνες έως ένα ή και δύο χρόνια. Τούτο δίνει τη δυνατότητα στα ενεχόμενα κράτη να λάβουν τα αναγκαία μέτρα για να εφαρμόσουν τις διατάξεις της σύμβασης. Σε πολλές περιπτώσεις ή κύρια ευθύνη για την εφαρμογή μιας διεθνούς σύμβασης πέφτει στο κράτος σημαίας του πλοίου. Εν τούτοις, πολλές συμβάσεις του IMO περιέχουν επίσης διατάξεις με τις οποίες επιτρέπουν ή απαιτούν από άλλα κράτη, ιδίως κράτη λιμένος (port states), να εφαρμόσουν τις απαιτήσεις των σχετικών συμβάσεων. Συνεπώς η αποτελεσματικότητα μιας σύμβασης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στον τρόπο με τον οποίο ένα κράτος την εφαρμόζει. Ο IMO, ως οργανισμός, δεν έχει την εξουσία ή τα μέσα ο να εφαρμόσει τις συμβάσεις αντί των κρατών. Ο ρόλος του IMO είναι να παροτρύνει τις κυβερνήσεις να λάβουν τα απαιτούμενα μέτρα. Και όπου είναι αναγκαίο, ο Οργανισμός παρέχει τεχνική συμβουλή και βοήθεια στις κυβερνήσεις όταν αυτές τις χρειασθούν. Όλες οι πολυμερείς συμβάσεις του IMO περιέχουν διατάξεις σχετικά με τροποποιήσεις. Τούτο είναι σημαντικό ιδίως σε τεχνική σύμβαση υιοθετημένη από τον IMO,

η οποία χρειάζεται να εκσυγχρονίζεται και να τροποποιείται έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις ταχείες αλλαγές της ναυτιλίας και της τεχνολογίας.

Σε μερικές συμβάσεις, οι προτεινόμενες τροποποιήσεις οι οποίες έχουν υιοθετηθεί πρέπει να γίνονται αποδεκτές από ένα καθορισμένο ποσοστό συμβαλλομένων κρατών πριν αυτές τεθούν σε ισχύ. Τούτο είναι γνωστό σαν διαδικασία «ρητής αποδοχής» (express acceptance).

Σε άλλες περιπτώσεις έχει υιοθετηθεί το καλούμενο σύστημα «σιωπηρής αποδοχής» (tacit acceptance). Τούτο σημαίνει ότι, οι τροποποιήσεις θα τεθούν σε ισχύ σε καθορισμένη ημερομηνία εκτός αν ένας συμφωνημένος αριθμός συμβαλλομένων κρατών ρητώς υποδεικνύει την αντίρρηση του στις τροποποιήσεις αυτές. Η διαδικασία της «σιωπηρής αποδοχής» υιοθετήθηκε από τον IMO για να γίνονται οι τροποποιήσεις πιο εύκολα και γρήγορα.

## **2.2.4 Σημαντικές πρωτοβουλίες-Συμβάσεις του IMO .**

### **2.2.4.1 Διεθνής σύμβαση περί αστικής ευθύνης για ζημιές από πετρέλαιο, 1969/1992.**

Η διεθνής κοινότητα έχοντας επίγνωση αφενός των κινδύνων ρύπανσης λόγω της παγκόσμιας μεταφοράς πετρελαίου δια θαλάσσης και αφετέρου της ανάγκης εξασφάλισης επαρκούς αποζημίωσης στα θύματα των ζημιών από την ρύπανση, θεώρησε αναγκαίο και επιτακτικό την υιοθέτηση ομοιόμορφων διεθνών κανόνων και διαδικασιών αντιμετώπισης του προβλήματος. Ο IMO, αρμόδιο όργανο ελέγχου των θαλάσσιων μεταφορών και προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος, συγκάλεσε το 1969 διπλωματική διάσκεψη, η οποία υιοθέτησε τη «Διεθνή σύμβαση περί αστικής ευθύνης για ζημιές από πετρέλαιο, 1969 – CLC Convention» που καθιέρωσε την αρχή της περιορισμένης ευθύνης του πλοιοκτήτη και προέβλεψε σύστημα υποχρεωτικής ασφάλισης των πλοιοκτητών.

#### **2.2.4.2 Διεθνής σύμβαση περί ίδρυσης κεφαλαίου για την αποζημίωση από πετρέλαιο, 1971 –Fund convention**

Το καθεστώς της σύμβασης CLC επικρίθηκε ως ανεπαρκές εφόσον δεν μπορούσε να παρέχει πλήρη αποζημίωση στα θύματα. Επομένως ήταν αναγκαίο να καθιερωθεί ένα σύστημα συμπληρωματικής αποζημιώσεως και ο IMO προχώρησε το 1971 στην υιοθέτηση της σύμβασης για την ίδρυση διεθνούς κεφαλαίου με σκοπό την αποζημίωση σε περιπτώσεις ρυπάνσεως από πετρέλαιο (Convention on the Establishment of an International Fund for Compensation for Oil Pollution Damage), η οποία τέθηκε σε ισχύ το 1978. Είναι γνωστή ως FUND και συμβαλλόμενα μέρη μπορούν να είναι μόνο τα κράτη-μέλη της CLC.

#### **2.2.4.3 MARPOL 1973/78 (Διεθνής σύμβαση για την προστασία της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία)**

Κυρίαρχη θέση στον τομέα της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος κατέχει η διεθνής σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης της θάλασσας από τα πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) το 1973 μαζί με το πρωτόκολλο του 1978, η οποία τέθηκε σε ισχύ το 1983 και είναι γνωστή ως MARPOL. Η εν λόγω σύμβαση περιλαμβάνει σήμερα έξι παραρτήματα και δύο πρωτόκολλα.

Η ιδέα της δημιουργίας μιας διεθνούς συμβάσεως που να καλύπτει όλες τις μορφές θαλάσσιας ρύπανσης τέθηκε το 1968 κατά τη διάρκεια της 23<sup>ης</sup> συνόδου της γενικής συνέλευσης του ΟΗΕ. Η συνέλευση του IMO αποφάσισε να συγκαλέσει μια διεθνή συνδιάσκεψη για τη θαλάσσια ρύπανση το 1973, με σκοπό την προετοιμασία μιας διεθνούς συμβάσεως για τη μείωση της ρυπάνσεως του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η διεθνής συνδιάσκεψη για τη θαλάσσια ρύπανση πραγματοποιήθηκε στο Λονδίνο στα τέλη του 1973.

Η συνδιάσκεψη υιοθέτησε τη διεθνή συνθήκη για τη πρόληψη της θαλάσσιας ρυπάνσεως από τα Πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – MARPOL) αρχικά με τα 5 παραρτήματα της. Η MARPOL αντικατέστησε την προηγούμενη σύμβαση του IMO, την OILPOL (1954) και τις τροποποιήσεις της και θεωρείται μια από τις σπουδαιότερες στον τομέα της θαλάσσιας ρύπανσης.



Περιλαμβάνει πλέον (από το 1997) έξι (6) παραρτήματα και δύο (2) πρωτόκολλα.

Οι περισσότεροι κανονισμοί της MARPOL αναφέρονται σε ζητήματα σχεδιασμού, κατασκευής, εξοπλισμού των πλοίων, επιθεωρήσεων και ευκολιών υποδοχής καταλοίπων.

Με άλλα λόγια, η MARPOL καλύπτει όλες τις περιπτώσεις τεχνικής φύσεως για τη ρύπανση της θάλασσας από τα εμπορικά πλοία εκτός από τις εσκεμμένες απορρίψεις υλικών και εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους των εμπορικών πλοίων, εκτός αυτών που χρησιμοποιούνται για την εξόρυξη και εκμετάλλευση της υφαλοκρηπίδας και του βυθού των θαλασσών (π.χ. εξέδρες, επιπλέοντα γεωτρύπανα κλπ).

Σε αντίθεση με όλες τις άλλες μέχρι τότε συμβάσεις του IMO για τη θαλάσσια ρύπανση, η MARPOL αναφέρεται σε όλες τις μορφές θαλάσσιας ρύπανσης που προκαλούνται από τη λειτουργία των εμπορικών πλοίων. Καλύπτει την τυχαία και λειτουργική ρύπανση από πετρέλαιο καθώς επίσης τη μόλυνση από τις χημικές ουσίες, αγαθά σε συσκευασμένη μορφή, τα λύματα, τα απορρίμματα και την ατμοσφαιρική ρύπανση (IMO, 2019).

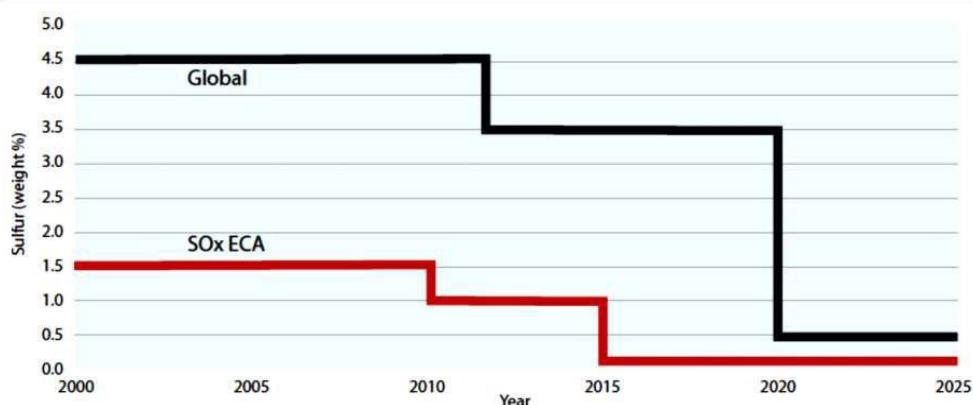
## **Marpol Annex VI**

Οι εκπομπές μη-αερίων του θερμοκηπίου ρυθμίζονται από τον IMO. Το παράρτημα VI της MARPOL που συμπλήρωσε την σύμβαση το 1997 και άρχισε να ισχύει από τον Μάιο του 2005, εξειδικεύει τις εκπομπές καυσαερίων στην ατμόσφαιρα και αναφέρει τα οξειδία του θείου ( $SO_x$ ), τα οξειδία του αζώτου ( $NO_x$ ), τα αιωρούμενα σωματίδια, καθώς τις πτητικές οργανικές ενώσεις. Με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη σύγχρονης τεχνολογίας ο IMO επικαιροποίησε πολλές φορές το παράρτημα VI με σκοπό να μειώσει όσο γίνεται περισσότερο τους ατμοσφαιρικούς ρύπους που προέρχονται από την ναυτιλία ( Bazarı & Longva, 2011).

Για τα οξειδία του θείου ( $SO_x$ ) το παράρτημα προβλέπει την μείωση των εκπομπών από το 3,5% στο 0,5% από τις αρχές του 2020. Αξίζει να σημειωθεί ότι από τις αρχές του 2015 τα όρια στις περιοχές ελέγχου εκπομπής θείου SECAs (Sulphur Emissions Control Areas) έχουν μειωθεί στο 0,1%. Με τον όρο SECA, εννοούμε τις θαλάσσιες περιοχές, από τις οποίες τα παραπλέοντα πλοία υποχρεούνται να χρησιμοποιούν καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Συγκεντρωτικά τα όρια εκπομπών οξειδίου του θείου ( $SO_x$ ) εντός και εκτός περιοχών SECAs παρουσιάζονται στον παρακάτω **Πίνακα 4**:

Πίνακας 4: Προδιαγραφές εκπομπών SO<sub>x</sub> από τον IMO (Πηγή: Κοτρίκλα, 2015).

Εκτός SECA	Εντός SECA
4,50% (κ.β.) πριν την 1η Ιανουαρίου 2012	1,50% κ.β. πριν την 1η Ιουλίου 2010
3,50% (κ.β.) κατά και μετά την 1η Ιανουαρίου 2012	1,00% κ.β. κατά και μετά την 1η Ιουλίου 2010
0,50% (κ.β.) κατά και μετά την 1η Ιανουαρίου 2020*	0,10% κ.β. κατά και μετά την 1η Ιουλίου 2015



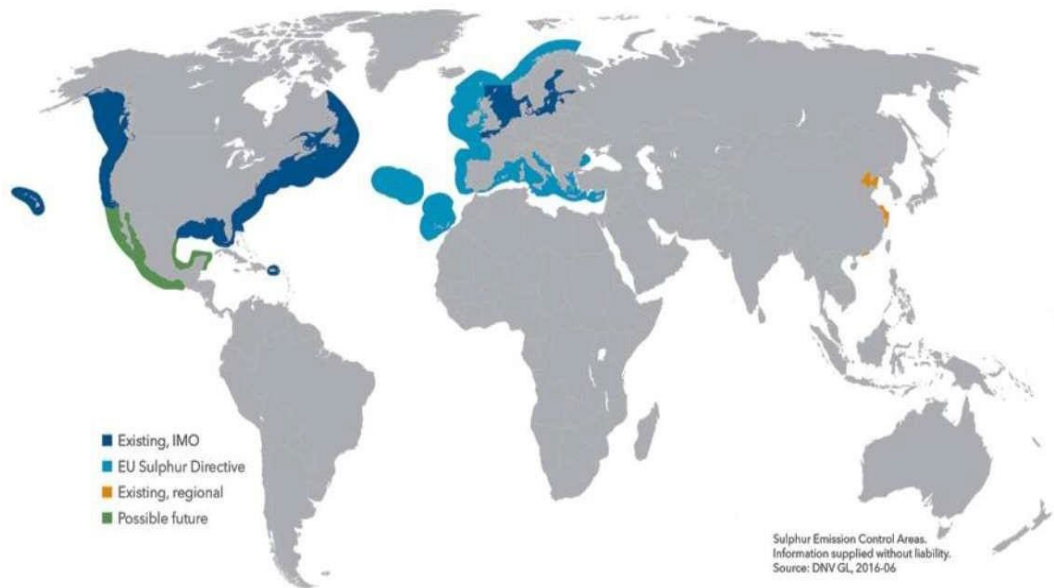
Για τα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) το παράρτημα έχει υλοποιήσει τρεις βαθμίδες ρυθμιστικού πλαισίου για τη μείωση των εκπομπών από τη ναυτιλία. Το πρώτο στάδιο της μείωσης NO<sub>x</sub>, γνωστό και ως IMO Tier I, τέθηκε σε ισχύ το 2000 και το επόμενο στάδιο, IMO Tier II, τέθηκε σε ισχύ το 2011, Το επόμενο βήμα, IMO Tier III, προβλέπει μειώσεις, της τάξης του 80% από τα επίπεδα του IMO Tier I.

Πίνακας SEQ Πίνακας \\* ARABIC 5: Προδιαγραφές εκπομπών NO<sub>x</sub> βάσει του IMO (Πηγή: Κοτρίκλα 2015)

Tier	Date	NO <sub>x</sub> Limit, g/kWh		
		n<130	130<n<2000	n>2000
Tier I	200	17.0	$45n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016	3.4	$9n^{-0.2}$	1.96

**In NO<sub>x</sub> Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs)**

Ο παρακάτω χάρτης που παρατίθεται παρουσιάζει τις υπάρχουσες και τις σχεδιαζόμενες περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECAs).



Παρατηρώντας τις περιοχές ελέγχου μπορούμε ξεκάθαρα να διαπιστώσουμε την αναγκαιότητα γρήγορης επέκτασης του μέτρου και στις υπόλοιπες περιοχές. Η Ελλάδα ως κράτος-μέλος της παγκόσμια ναυτιλιακής κοινότητας έχει επικυρώσει όλα τα παραρτήματα και τις τροποποιήσεις της διεθνούς σύμβασης MARPOL 73/78.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

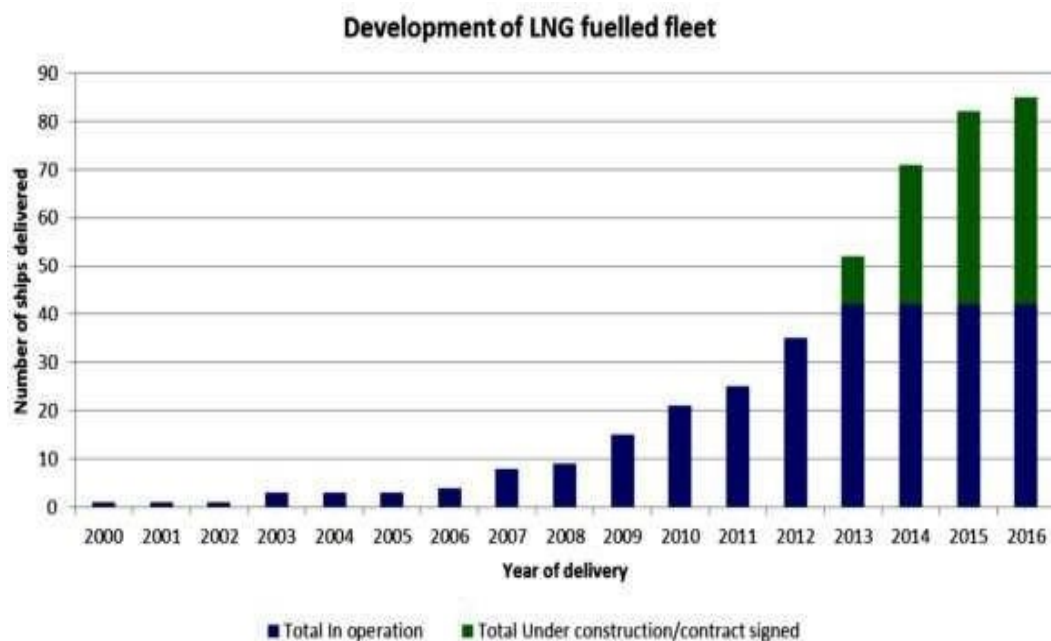
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι φανερό ότι άμεση προτεραιότητα της ναυτιλιακής βιομηχανίας σήμερα είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή των ενδεδειγμένων περιβαλλοντικά και παράλληλα αποδοτικών πρακτικών που θα πληρούν τα αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα που ισχύουν από το 2015 και μετά. Ο τελικός στόχος είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών μηδενικών εκπομπών ρύπων. Ως αποτέλεσμα του ρυθμιστικού πλαισίου του IMO, οι περισσότερες τεχνολογίες που αναπτύσσονται αφορούν τη μείωση των NO<sub>x</sub> και SO<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>. Παρ' όλα αυτά, ορισμένες τεχνολογίες επιδρούν επίσης στις εκπομπές των αιωρούμενων σωματιδίων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην χρήση εναλλακτικών καυσίμων καθώς και στις εναλλακτικές μορφές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα πλοία. Στην τελευταία παράγραφο θα παρουσιαστούν ορισμένα παραδείγματα πλοίων που αναμένεται να παίξουν καθοριστικό ρόλο τα επόμενα χρόνια στη μετάβαση σε μια πιο οικολογική και μακροπρόθεσμα οικονομικά συμφέρουσα ναυτιλία.

### **3.2 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ**

#### **3.2.1 Υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas- LNG)**

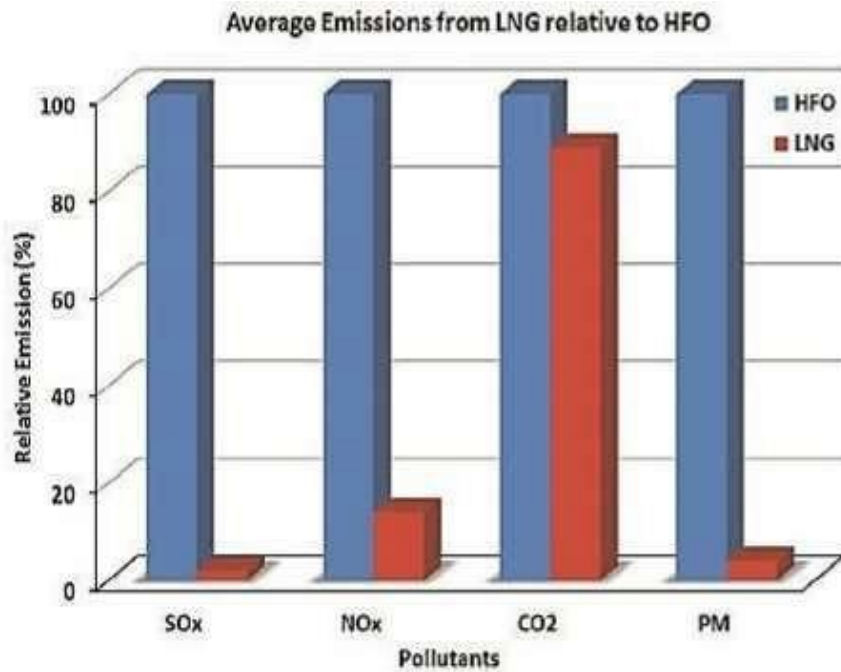
Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) αποτελεί ένα από τα καθαρότερα καύσιμα και δύναται να χρησιμοποιηθεί ευρέως στα συστήματα πρόωσης των πλοίων. Οι νέες τεχνολογίες στην πρόωση καθώς και η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα το καθιστούν βασικό ανταγωνιστή τους, και από αρκετούς ειδικούς θεωρείται πως στις επόμενες δεκαετίες η πλειοψηφία των πλοίων της ακτοπλοΐας θα το χρησιμοποιεί ως βασικό καύσιμο (International Maritime Organization, 2016 **(Εικόνα 18)**)



**Εικόνα 18:** Πλοία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)(Πηγή: <https://www.dnvgl.com>)

Το LNG προτιμάται προς το παρόν κατά κύριο λόγο από τα πλοία μεταφοράς του, μιας και την καύσιμη ύλη την προσλαμβάνουν από το προς μεταφορά φορτίο. Στα υπάρχοντα πλοία με συμβατική πρόωση χρειάζονται εκτεταμένες μετασκευές για την χρησιμοποίησή του και ιδιαίτερα για τον χώρο αποθήκευσης του καθόσον για το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο απαιτείται περίπου 1,8 μεγαλύτερος όγκος αποθήκευσης. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ενώ υπάρχει σημαντικός αριθμός πλοίων με καύσιμη ύλη το LNG να μην έχει αναπτυχθεί ακόμα μεγάλο δίκτυο διακίνησης (Κολάκη, 2016). Οι εκπομπές καυσαερίων των μηχανών που τροφοδοτούνται με LNG συγκριτικά με τις εκπομπές μηχανών HFO μαρτυρούν το πλεονέκτημα χρήσης του φυσικού αερίου προς όφελος του περιβάλλοντος. Τα οξείδια του θείου SO<sub>x</sub> όπως επίσης και τα αιωρούμενα σωματίδια PM είναι σχεδόν αμελητέα ενώ τα οξείδια του αζώτου NO<sub>x</sub> είναι μειωμένα κατά 85% περίπου. Μικρότερη μείωση, της τάξης του 15%, παρατηρείται και στις τιμές του CO<sub>2</sub>.

Πλεονέκτημα για την χρήση του LNG αποτελεί το γεγονός ότι τα αποθέματα του φυσικού αερίου είναι κατά πολύ υψηλότερα από τα αποθέματα πετρελαίου. Το κόστος εγκατάστασης σε ένα πλοίο μηχανής πρόωσης με καύσιμο LNG είναι μεγαλύτερο από το κόστος της μηχανής συμβατικών καυσίμων περίπου 10-15% (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Σύγκριση εκπομπών HFO σε σχέση με LNG (Πηγή: Research Gate, 2019)

Το γεγονός όμως ότι παρατηρείται διαφορά τιμής των καυσίμων (**Εικόνα 20**) αποτελεί κίνητρο για τους πλοιοκτήτες όπως μπορούμε να δούμε και στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα που καταγράφει τις τιμές των δύο καυσίμων διαχρονικά από τον Δεκέμβριο του 2015 έως τον Απρίλιο του 2019.



Εικόνα 20: Σύγκριση τιμών LNG και MDO (Πηγή: KinetrexEnergy, 2019).

### 3.2.2 Βιοκαύσιμα (Biofuels)

Εναλλακτικά καύσιμα θεωρούνται και τα βιοκαύσιμα τα οποία παράγονται από βιομάζα (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2009) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως καύσιμα μεταφοράς, σε ανάμιξη ή μη, με άλλα παράγωγα του πετρελαίου. Τα βιοκαύσιμα είναι υγρά ή αέρια και ειδικότερα, κατηγοριοποιούνται ως κάτωθι:

- Το βιοντήζελ (πετρέλαιο βιολογικής προέλευσης) το οποίο αποτελείται από μεθυλεστέρες των λιπαρών οξέων (Fatty Acid Methyl Esters FAME) που παράγονται από φυτικά ή ζωικά έλαια και λίπη και είναι ποιότητας πετρελαίου ντήζελ.
- Η βιοαιθανόλη η οποία είναι αιθανόλη που παράγεται από βιομάζα ή από βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα αποβλήτων.
- Το βιοαέριο το οποίο είναι το καύσιμο αέριο που παράγεται από βιομάζα ή βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων, και μπορεί να καθαριστεί και να αναβαθμιστεί σε ποιότητα φυσικού αερίου.
- Η βιομεθανόλη η οποία είναι η μεθανόλη που παράγεται από βιομάζα.

Η νέα τεχνολογία, η οποία αναπτύχθηκε πρόσφατα, είναι ακόμα σε βρεφικό στάδιο και θα πρέπει να διανύσει μεγάλη απόσταση ώστε να καλύψει τις αρχικές προσδοκίες. Οι κύριες πρώτες ύλες της βιομάζας που χρησιμοποιούνται εμπορικά για παραγωγή ενέργειας (μέσω καύσης) είναι τα υπολείμματα από επεξεργασία ξυλείας, χάρτου ή αστικών υπολείμματος. Ωστόσο, μέχρι τώρα για παραγωγή βιοκαυσίμων χρησιμοποιούνται κυρίως καρποί από καλαμπόκι (για βιοαιθανόλη) και σόγια (για βιοντήζελ), τα οποία καλούνται πρώτης γενιάς βιοκαύσιμα (Kalligeros, et al., 2017) (IRENA, 2016).

### 3.2.2.1 Βιοντήζελ (Biodiesel)

Το βιοντήζελ σε σύγκριση με το πετρελαϊκό ντήζελ διαθέτει κάποια πλεονεκτήματα κατά την εφαρμογή του ως καύσιμο τα οποία και το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό ως προς τη χρήση. Καταρχάς η διαδικασία παραγωγής του συγκεκριμένου εναλλακτικού καυσίμου μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> κατά 80 % σε σχέση με την παραγωγή του συμβατικού. Το βιοντήζελ δεν περιέχει θείο, αρωματικούς υδρογονάνθρακες και μέταλλα, οπότε και τα καυσαέρια των μηχανών θα είναι λιγότερο επιβλαβή για τον άνθρωπο και γενικότερα για το περιβάλλον. Σημαντικό πλεονέκτημα για το βιοντήζελ αποτελεί το γεγονός ότι για την χρησιμοποίησή του ως αντικαταστάτη του ντήζελ δεν απαιτεί κάποια τροποποίηση στους χώρους αποθήκευσης, στα συστήματα διανομής και στην μηχανές.

Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το βιοντήζελ, δεν αποτελεί την πανάκεια του καυσίμου του μέλλοντος καθώς διαπιστώνονται αρκετά μειονεκτήματα σχετικά με την παραγωγή και τη χρήση του. Σημαντικό μειονέκτημα που παρατηρείται προς το παρόν σε όλα τα βιοκαύσιμα, αποτελεί το γεγονός ότι η απόδοση και τα χαρακτηριστικά του είναι σε άμεση συνάρτηση με τη σύσταση της πρώτης ύλης και κατά μεγάλο ποσοστό εμφανίζονται μεγάλες διακυμάνσεις ανά περίπτωση. Επίσης το βιοντήζελ έχει εξαιρετικές ιδιότητες ως διαλύτης, με ορατό κίνδυνο να συμπαρασύρει αποθέσεις από τις επιφάνειες των αντιδραστήρων ή των σωληνώσεων νοθεύοντας την ποιότητά του με ανεπιθύμητες ή τοξικές ενώσεις (π.χ. θειούχα παράγωγα). Σε συνέχεια της προηγούμενης ιδιότητας του, καύσιμα με υψηλές προσμίξεις με βιοντήζελ παρουσιάζουν σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα σημαντικές φθορές στα ελαστικά τμήματα των μηχανών καύσης. Το βασικότερο όμως μειονέκτημα του βιοντήζελ που δρα ως τροχοπέδη σε κάθε προσπάθεια αλλαγής από την μεριά των πλοιοκτητών είναι το αυξημένο κόστος της τιμής του, η οποία κυμαίνεται μιάμιση (1.5) με δύο (2) φορές υψηλότερη από το συμβατικό ντήζελ ανάλογα με τον τύπο της πρώτης ύλης και το μέγεθος της βιομηχανίας (Duncan , 2003) (Kanthavelkumaran & Seenikannan, 2012)



### 3.2.2.2 Βιοαιθανόλη

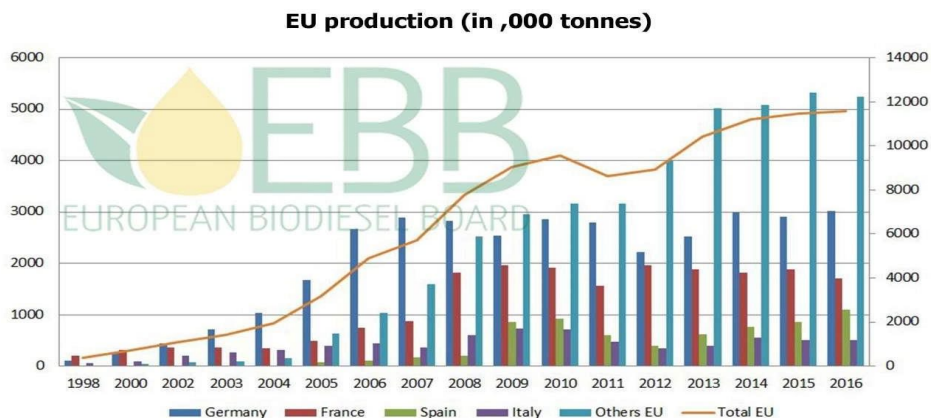
Είναι η αιθυλική αλκοόλη ( $C_2H_5OH$ ). Ονομάζεται επίσης οινόπνευμα, βιοαιθανόλη ή αιθανόλη. Παράγεται από βιομάζα με τη μέθοδο της ενζυματικής υδρόλυσης και αποτελεί το πρώτο υγρό βιοκαύσιμο που δημιουργήθηκε ως υποκατάστατο της βενζίνης για οχήματα. Είναι ένα εναλλακτικό καύσιμο το οποίο παράγεται κατά κύριο λόγο από την ζάχαρη με την μέθοδο της αλκοολικής ζύμωσης. Αξίζει να τονίσουμε ότι ειδικά στην βιοαιθανόλη, όπως και σε όλα τα βιοκαύσιμα, η φύση της βιομάζας που έχουμε ως πρώτη ύλη για κατεργασία είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση της διεργασίας και το τελικό αποτέλεσμα. Η βιοαιθανόλη είναι ένα άχρωμο, διαυγές υγρό υψηλής ενεργειακής περιεκτικότητας και θεωρείται «καθαρότερο» από την βενζίνη. Η τέλεια καύση της παράγει μόνο καθαρές εκπομπές θερμότητας, ατμού και διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ). Επιπλέον, η πρόσμιξη της με βενζίνη λόγω του ότι περιέχει υψηλό αριθμό οκτανίων, την καθιστά εξαιρετικό βελτιωτικό για χρήση σε οχήματα με σημαντικά αποτελέσματα στην μείωση των εκπομπών επικίνδυνων καυσαερίων. Βέβαια μεγάλο της μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι πρώτες ύλες της βιομάζας που απαιτείται για την δημιουργία της είναι αγροτικά προϊόντα που αφενός χρειάζονται μεγάλες εκτάσεις για την καλλιέργεια τους και αφετέρου η εκμετάλλευση καλλιεργήσιμων εκτάσεων για παραγωγή καυσίμων και όχι τροφών προς κάλυψη αναγκών δημιουργεί περισσότερα προβλήματα από όσα επιλύει. Το κόστος της βιοαιθανόλης εξαρτάται πρωτίστως από το κόστος της πρώτης ύλης, μιας και ο ανταγωνισμός μεταξύ τροφικών και ενεργειακών καλλιεργειών αυξάνει γενικότερα το κόστος της καλλιέργειας και δευτερευόντως από την αξιοποίηση των παραγόμενων υποπροϊόντων (Lyman, 2016).

### 3.2.2.3 Βιοαέριο

Είναι το αέριο καύσιμο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών κυρίως αποβλήτων (λύματα από χοιροστάσια, βουστάσια), αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων και λυμάτων, καθώς και από αστικά οργανικά απορρίμματα. Αποτελείται από 65% μεθάνιο και 35% διοξείδιο του άνθρακα. Ένα κυβικό μέτρο βιοαερίου υποκαθιστά 0,66 λίτρα ντίζελ. Το βιοαέριο, με την κατάλληλη επεξεργασία και αναβάθμιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο μεταφορών, με ιδιαίτερα ανταγωνιστική τιμή. Επιπροσθέτως, το αναβαθμισμένο βιοαέριο μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου. Δεν αποτελεί εν δυνάμει ναυτιλιακό καύσιμο λόγω της μικρής διαθεσιμότητάς του στην αγορά ( UK P&I Club, 2018).

### 3.2.2.4 Βιομεθανόλη

Είναι η μεθανόλη με δυνατότητα παραγωγής από βιομάζα, για χρήση ως βιοκαύσιμο και από μίγματα σύνθεσης αερίου  $H_2$  και  $CO$ . Η βιομεθανόλη παράγεται από αγροτικά υπολείμματα, από αστικά λύματα αλλά και από υποπροϊόντα της παραγωγής όπως η ακατέργαστη γλυκερίνη και τα υπολείμματα από την παραγωγή χαρτιού. Χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή άλλων χημικών, όπως, για παράδειγμα, πρόσθετα της βενζίνης, διαλύτες και αντιψυκτικά, ή στην διαδικασία παραγωγής βιοντήζελ. Μειονεκτήματά είναι το ιδιαίτερα υψηλό κόστος παραγωγής της, έως και τέσσερις (4) φορές μεγαλύτερο από αυτό της βενζίνης. Η βιομεθανόλη προκρίνει τον ανταγωνισμό με τις τροφικές καλλιέργειες συντελώντας έτσι στην αύξηση της τιμής των τροφίμων. Είναι κατανοητό ότι ενώ ως βιοκαύσιμο ενδιαφέρει την ναυτιλία, το κόστος απόκτησης της, εκμηδενίζει προς στιγμήν κάθε σκέψη για εκμετάλλευση της πέρα από επιστημονικούς και ερευνητικούς σκοπούς (Andersson, 2015).



Εικόνα 21: Παραγωγή βιοκαυσίμων στην Ε.Ε (Πηγή: <https://www.ebb-eu.org/stats.php>)

Από όλα τα ανωτέρω (Εικόνα 21) γίνεται αντιληπτό πως για να γίνει κάποια στιγμή στο μέλλον εφικτή η αντικατάσταση του πετρελαϊκού ντήζελ με κάποιο τύπο από τα βιοκαύσιμα θα πρέπει να πληρούνται τουλάχιστον οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα του προϊόντος ώστε να καλύπτεται η ζήτηση της αγοράς
- Να υπάρχει περιβαλλοντική αποδοχή του τελικού προϊόντος για να καλύπτεται ο βασικός λόγος δημιουργίας τους, και
- Να είναι οικονομικά βιώσιμη η παραγωγή του ώστε να υπάρχει επιπλέον κίνητρο για την χρησιμοποίησή του.

Μέχρι όμως να φτάσουμε στην αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τα βιοκαύσιμα θα πρέπει να τονίσουμε ένα συνολικό πλεονέκτημα τους που δίνει περαιτέρω ώθηση για επιστημονική έρευνα. Τα βιοκαύσιμα στο σύνολο τους μπορούν να αναμιγνύονται με έτερα καύσιμα που χρησιμοποιούνται ευρέως και να παράγουν καλύτερο αποτέλεσμα. Στο πλαίσιο της παγκόσμιας προσπάθειας για δραστική μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης θα ήταν ένα βήμα προς την θετική κατεύθυνση η υιοθέτηση κανόνων για χρήση από την ναυτιλία κατάλληλων μιγμάτων βιοντίζελ και συμβατικών ναυτιλιακών καυσίμων (Chryssakis, 2014)

### **3.2.3 Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (Liquefied Petroleum Gas, LPG)**

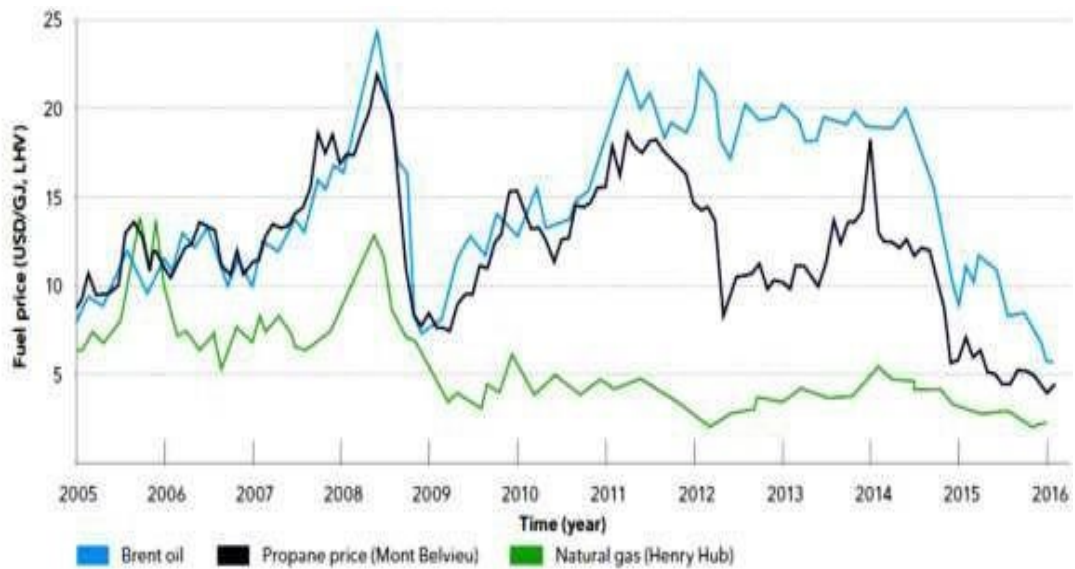
Το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (Liquefied Petroleum Gas LPG) είναι εξ ορισμού οποιοδήποτε μίγμα προπανίου και βουτανίου σε υγρή μορφή. Μείγμα βουτανίου και προπανίου χρησιμοποιούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος στα ειδικά χαρακτηριστικά του αερίου. Το προπάνιο είναι αέριο υπό συνθήκες περιβάλλοντος, με σημείο ζέσεως τους  $-42^{\circ}\text{C}$ . Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υγρό με εφαρμογή μέτριας πίεσης (8,4 bar στους  $20^{\circ}\text{C}$ ). Το βουτάνιο μπορεί να βρεθεί σε δύο μορφές: n-βουτάνιο ή iso-βουτάνιο, τα οποία έχουν σημείο ζέσεως  $-0,5^{\circ}\text{C}$  και  $-12^{\circ}\text{C}$ , αντίστοιχα. Δεδομένου ότι και τα δύο ισομερή έχουν υψηλότερο σημεία βρασμού από το προπάνιο, μπορούν να ρευστοποιηθούν σε χαμηλότερη πίεση. Οι δεξαμενές καυσίμου LPG είναι μεγαλύτερες από τις δεξαμενές πετρελαίου λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας.

Υπάρχουν δύο κύριες πηγές παραγωγής LPG:

1. ως ένα υποπροϊόν της παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου ή
2. ως υποπροϊόν του απόσταξης κατά την διύλιση του πετρελαίου. (Teo, 2016)

Μέχρι το 2010, οι τιμές των προπανίων στις ΗΠΑ ήταν πολύ υψηλές πλησίον αυτών του αργού πετρελαίου Brent (DNVGL, 2018). Από το 2011 όμως, έχει τάσεις μείωσης της τιμής πώλησης του λόγω κυρίως της αύξησης της παραγωγής LPG ως υποπροϊόν του σχιστόλιθου πετρέλαιο και αερίου. Επί του παρόντος, το LPG είναι ακριβότερο από το LNG αλλά φθηνότερο από το πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (**Εικόνα 22**).

Στα μεγάλα λιμάνια της Ευρώπης υπάρχει ήδη εκτεταμένο δίκτυο εισαγωγής LPG και τερματικών σταθμών. Είναι σχετικά εύκολο στο μέλλον και ανάλογα της ζήτησης από τα πλοία να αναπτυχθεί υποδομή ανεφοδιασμού στο υπάρχον δίκτυο LPG, προσθέτοντας απλά εγκαταστάσεις διανομής.



Εικόνα 22: Τιμές πώλησης LPG σε σύγκριση με πετρέλαιο και φυσικό αέριο (Πηγή: DNVGL, 2018).

### 3.2.4 Αμμωνία σαν καύσιμο

Η αμμωνία είναι ένα από τα πιο κοινά παραγόμενα συνθετικά χημικά προϊόντα, αφού χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή λιπασμάτων. Ωστόσο, η αμμωνία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν ένα καύσιμο με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου (με τις μόνες εκπομπές να οφείλονται στους διάφορους τρόπους παραγωγής της.) Η παραγωγή της αμμωνίας στηρίζεται συνήθως στη διαδικασία Haber-Bosch, κατά την οποία παράγεται από άζωτο και υδρογόνο με καταλύτη βασισμένο στο σίδηρο σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση. Το άζωτο απομονώνεται από τον αέρα, ενώ το υδρογόνο παράγεται με ένα από τους τρόπους που αναφέραμε στην προηγούμενη υποενότητα. Η αμμωνία μπορεί επίσης να παραχθεί με ηλεκτροχημικές μεθόδους από άζωτο και υδρογόνο ή άζωτο και νερό και με φωτοσυνθετικές μεθόδους (όχι οικονομικά) από άζωτο και νερό. Οπότε, το πόσο «πράσινη» είναι η αμμωνία εξαρτάται από την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα κατά την παραγωγή της ίδιας ή των ουσιών που απαιτεί η παραγωγή της (Xing et al, 2021).

Η αμμωνία αποθηκεύεται στους -33 βαθμούς και ατμοσφαιρική πίεση σε μονωμένες δεξαμενές. Λόγω του κινδύνου έκρηξης και της μεγάλης τοξικότητας της αμμωνίας, υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις ασφάλειας για τη μεταφορά και αποθήκευσή της. Ωστόσο, υπάρχει και η δυνατότητα ασφαλούς αποθήκευσης της αμμωνίας με τη μορφή των στερεών αλάτων αμίνης-μετάλλων, ανθρακικής αμμωνίας ή ουρίας, με μικρή μείωση της ογκομετρικής πυκνότητας

ενέργειας. Η στερεά μορφή απελευθερώνει αμμωνία με θέρμανση, υδρόλυση ή αντίδραση (αντιδράσεις που παράγουν διοξείδιο του άνθρακα και/η άλλα απόβλητα.)

Η αμμωνία μπορεί επίσης να τροφοδοτηθεί απευθείας σε μηχανή εσωτερικής καύσης, και η διαδικασία έχει δοκιμαστεί πολλές φορές ερευνητικά. Ωστόσο, πρέπει να συνδυαστεί με κάποιο άλλο καύσιμο ή ειδικούς τρόπους ανάφλεξης, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας αυτοανάφλεξης. Η ανάμιξη της αμμωνίας με άλλα καύσιμα βελτιώνει τα χαρακτηριστικά καύσης και μπορεί να είναι η καλύτερη επιλογή – αλλά βέβαια τότε θα υπάρχουν εκπομπές οξειδίων του αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα. Η αμμωνία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου.

Τέλος, η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φορέας υδρογόνου, μια και έχει καλύτερα χαρακτηριστικά αποθήκευσης και μεταφοράς, παράγοντας υδρογόνο που θα χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο.

### **3.2.5 Μεθανόλη και συνθετικά καύσιμα**

Η μεθανόλη η πιο απλά αλκοόλη, ένα υγρό καύσιμο με χαμηλό σημείο ανάφλεξης και μηδενική περιεκτικότητα σε θείο, που έχει μικρότερες εκπομπές από τα συμβατικά ναυτικά καύσιμα, αλλά μεταφέρεται και αποθηκεύεται ευκολότερα από το φυσικό αέριο, το υδρογόνο και την αμμωνία. Παράγεται συνήθως σε τρία στάδια, με πρώτο την παραγωγή syngas (μίγματος υδρογόνου και μονοξειδίου), δεύτερο την καθαυτό σύνθεση και τρίτο την επεξεργασία της μεθανόλης. Η παραγωγή ξεκινά συνήθως με φυσικό αέριο, άνθρακα, πετρέλαιο, βιομάζα, απόβλητα ή ακόμα και με διοξείδιο του άνθρακα. Η μεθανόλη από ανανεώσιμες πηγές παράγεται συνήθως από υπολείμματα ξύλου και γεωργικών προϊόντων, υπολείμματα της βιομηχανίας χαρτιού και χαρτοπολτού, και αστικά απόβλητα. Αν στην παραγωγή χρησιμοποιηθεί ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, θεωρείται καύσιμο μηδενικών εκπομπών σε όλο τον κύκλο ζωής, κάτι πολύ σπάνιο στην παρούσα φάση (Xing, 2021).

Η μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν απευθείας καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου, χωρίς ιδιαίτερες μετατροπές, και υπάρχουν ήδη εφαρμογές μικτών καυσίμων στη ναυτιλία. Δεν απαιτεί ειδικές μετατροπές για μεταφορά και αποθήκευση, γιατί είναι υγρή σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, αλλά είναι εξαιρετικά τοξική για τον άνθρωπο, απαιτεί ειδικό χειρισμό λόγω του χαμηλού σημείου ανάφλεξης και είναι ασύμβατη με ορισμένα υλικά δεξαμενών. Ακόμα, έχει περίπου τη μισή ενεργειακή πυκνότητα κατόγχο σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα, άρα απαιτεί περίπου διπλασιασμό των δεξαμενών καυσίμου, με αντίστοιχη ζημία ως προς τον ωφέλιμο χώρο αποθήκευσης των πλοίων που τη χρησιμοποιούν.

Η μεθανόλη είναι ένα μόνο από τη σειρά συνθετικών καυσίμων (η μεθανόλη μπορεί να παρασκευαστεί σαν συνθετικό καύσιμο ή όχι) που μπορούν να παραχθούν με τη χρήση

ηλεκτρικής ενέργειας και πρώτες ύλες που δεν είναι ορυκτά καύσιμα, όπως πχ το υδρογόνο, το νερό, οργανικά απόβλητα, το διοξείδιο του άνθρακα που έχει ανακτηθεί από άλλες βιομηχανικές διαδικασίες, κτλ. Η διαδικασία αυτή που ονομάζεται «Ενέργεια-προς-Καύσιμο» (Power to Fuel, PtF) μπορεί να παράγει από υδρογόνο (μέσω ηλεκτρόλυσης) μέχρι μίγματα υδρογονανθράκων σε αέρια (Power to Gas) ή υγρή μορφή (Power to Liquid), ανάλογα με τις χημικές διεργασίες που ακολουθούνται. Αν η ενέργεια που απαιτείται προέρχεται αυστηρά από ανανεώσιμες πηγές, και το υδρογόνο επίσης προέρχεται από ηλεκτρόλυση με χρήση ανανεώσιμων πηγών, τότε τα καύσιμα αυτά έχουν μηδενικές (ή και αρνητικές) εκπομπές αερίων θερμοκηπίου πράγμα που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά. Επιπλέον, επειδή η σύστασή τους ελέγχεται απόλυτα μπορούν να έχουν και μηδενικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου και του θείου, καθώς και μικροσωματιδίων.

Τα καύσιμα αυτά καθίστανται ακόμα πιο ελκυστικά από το γεγονός ότι δεν απαιτείται καμία μετατροπή στο υφιστάμενο σύστημα αποθήκευσης και τροφοδοσίας πλοίων στους λιμένες ούτε στις δεξαμενές και το σύστημα τροφοδοσίας ή τις μηχανές του ίδιου του πλοίου. Υπάρχουν ωστόσο τρεις μεγάλοι περιορισμοί στη χρήση των εναλλακτικών αυτών συνθετικών καυσίμων σε μεγάλη κλίμακα:

- Όπως είδαμε, η κατ' όγκο πυκνότητα ενέργειας των συνθετικών καυσίμων μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερη από τα συμβατικά καύσιμα, μειώνοντας την εμβέλεια για τον ίδιο όγκο. Αυτό οφείλεται στη διαφορά της χημικής σύστασης των συνθετικών καυσίμων (όπου είναι πιο εύκολο και πιο οικονομικό να δημιουργηθούν ενώσεις με μικρό μήκος ανθρακικής αλυσίδας, ενώ τα συμβατικά καύσιμα είναι μίγματα ενώσεων με μέσο και μεγάλο μήκος ανθρακικής αλυσίδας.)
- Η παραγωγή συνθετικών καυσίμων σε μεγάλη κλίμακα εξαρτάται από την διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποίες είναι διαθέσιμες για τη μεταβλητότητά τους από εποχή σε εποχή, και από ώρα σε ώρα μέσα στην ημέρα, και δε μπορούν να εγγυηθούν τη συνεχή παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα ή την εύκολη προσαρμογή σε αλλαγές της ζήτησης. (Μόνο η πυρηνική ενέργεια, αν θεωρηθεί εναλλακτική μορφή ενέργειας, μπορεί να παράσχει ηλεκτρική ενέργεια σε αξιόπιστα σταθερή βάση και εύκολη προσαρμογή σε μεταβολές της ζήτησης.)
- Η τιμή των συνθετικών καυσίμων εξαρτάται τελικά από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή αυτή, στις χώρες της Ευρώπης τουλάχιστον, διαμορφώνεται από την τιμή του πιο ακριβού διαθέσιμου τρόπου παραγωγής (φυσικό αέριο) η τιμή των καυσίμων είναι αυτή την στιγμή απαγορευτική. Φυσικά, στην περίπτωση αυτή και αφού δεν έχουν γίνει κοστοβόρες και χρονοβόρες μετατροπές των συστημάτων διάθεσης και των ίδιων των πλοίων, αυτά μπορούν εύκολα να μεταπέσουν στη χρήση συμβατικών καυσίμων. Ωστόσο, αυτό δείχνει τα πολύπλοκα εμπόδια τεχνο-οικονομικής φύσης που αντιμετωπίζει οποιαδήποτε πρόταση αλλαγής των συμβατικών καυσίμων.

Προς το παρόν, δεν υπάρχουν μεγάλα προγράμματα παραγωγής συνθετικών καυσίμων, και η τιμή τους είναι σημαντικά μεγαλύτερη των συμβατικών. Ωστόσο, είναι φανερό ότι είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση για την απανθρακοποίηση και καθαρισμό των καυσίμων της ναυτιλίας και πρέπει να παίξει αυξανόμενο ρόλο σαν ποσοστό χρήσης από το 2030 και μετά, αν σκοπεύουμε να πετύχουμε τους στόχους μείωσης εκπομπών για το 2050 που έχουν τεθεί σε διαδοχικές διεθνείς συσκέψεις για το κλίμα υπό την αιγίδα του ΟΗΕ.

### **3.2.6 Πυρηνική ενέργεια σε πλοία**

Είναι η ενέργεια που προκύπτει από την πυρηνική σχάση με σκοπό την μετατροπή της σε πρόωση και ηλεκτρισμό. Θεωρείται καθαρή ενέργεια με πολλές διατάξεις ασφαλείας πλην όμως και βάσει των ατυχημάτων που έχουν γίνει επιφέρει πολλά και μακροχρόνια προβλήματα. Το κόστος εγκατάστασης ενός αντιδραστήρα είναι αρκετά υψηλό αλλά σε προβολή με τον χρόνο λειτουργίας του πλοίου και το φθινό καύσιμο που χρησιμοποιεί το κάνει ως ένα από τα πιο συμφέροντα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Σε συνάρτηση με τις μηδενικές σχεδόν εκπομπές και την δεδομένη ασφάλεια του πληρώματος, εκκολάπτονται προϋποθέσεις ώστε η δημοφιλία της πυρηνικής πρόωσης να αυξάνεται συνεχώς. Ο ΙΜΟ υιοθέτησε από πολύ νωρίς έναν κώδικα όσον αφορά την ασφάλεια των πυρηνοκίνητων εμπορικών πλοίων ο οποίος ανάλογα με τις τεχνολογικές εξελίξεις ανανεώνεται και βελτιώνεται συνεχώς ( ΙΜΟ, 1982) (Balland, et al., 2014).

Έχοντας πάντα κατά νου την επικινδυνότητα ενός ατυχήματος η πυρηνική ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από πλοία τα οποία:

- Θα κινούνταν σε σταθερά δρομολόγια με χαμηλή ναυτιλιακή κίνηση και σταθερές πορείες. Όπως παραδείγματος χάρη η σύνδεση Κίνας –Νότιας Αμερικής.
- Ρυμουλκά που το πεδίο δράσης τους είναι οι μεγάλοι ωκεανοί
- Πλοία που δραστηριοποιούνται στους πόλους για να μην αφήνουν περιβαλλοντικό αποτύπωμα
- Κρουαζιερόπλοια, που αφενός οι απαιτήσεις σε κατανάλωση ενέργειας είναι μεγάλες και αφετέρου η απουσία θορύβου θα ικανοποιούσε τους επιβάτες σε μεγάλο βαθμό. (World Nuclear Association, 2018)

## 3.3 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

### 3.3.1 Ηλιακή ενέργεια

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών:

- τα παθητικά ηλιακά συστήματα,
- τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, και
- τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Με τον γενικό όρο φωτοβολταϊκά χαρακτηρίζονται οι βιομηχανικές διατάξεις μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στην ουσία πρόκειται για ηλεκτρογενήτριες που συγκροτούνται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία σε επίπεδη διάταξη που έχουν ως βάση λειτουργίας το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Αυτοί οι ηλιακοί συλλέκτες είναι δυνατόν να μειώσουν τη συνολική κατανάλωση καυσίμων σε ποσοστό 3,5% για δεξαμενόπλοια και 2,5% για πλοία μεταφοράς οχημάτων. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (pn Solar cell) αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο που αφορά τα φωτοβολταϊκά (photovoltaic) στοιχεία ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Μπεκερέλ (Becquerel). Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αφορά την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων των



φωτοβολταϊκών στοιχείων και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο. Το ηλιακό φως- ηλιακή ενέργεια είναι ουσιαστικά μικρά πακέτα ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια. Τα φωτόνια του ηλιακού φωτός- ενέργειας περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού ενεργειακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες π.χ. έχουν περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Όταν λοιπόν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (που είναι ουσιαστικά ένας ημιαγωγός), άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό. Αυτά τα τελευταία φωτόνια είναι που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα (ενέργεια). Τα φωτόνια αυτά αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού ή των φωτοβολταϊκών στοιχείων να μετακινηθούν σε άλλη θέση. Η βασική θεωρία του ηλεκτρισμού είναι η κίνηση των ηλεκτρονίων από το θετικό προς το αρνητικό. Σε αυτή την απλή αρχή της φυσικής λοιπόν βασίζεται μια από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια - φωτοβολταϊκα πάνελ έχουν ως βασικό μέρος το ηλιακό στοιχείο και είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός λεπτού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιούνται συχνά σε συστοιχίες για την παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρει η ηλιακή ενέργεια είναι τα εξής: είναι διαθέσιμη για πάντα και προσφέρεται δωρεάν, είναι απόλυτα φιλική προς το περιβάλλον δηλαδή η εκμετάλλευσή της δεν είναι ρυπογόνα, η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια γίνεται με μηδενική ρύπανση, αθόρυβα και αξιόπιστα. Επίσης υπάρχουν πολλοί τρόποι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είτε παθητικά για παράδειγμα ο σχεδιασμός κτιρίων, είτε ενεργητικά μέσω των ηλιακών θερμοσιφώνων και τέλος μέσω των φωτοβολταϊκών.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο πειραματικό σκάφος MS Turanor Planetsolar το οποίο πραγματοποίησε τον περίπλου της γης επιτυγχάνοντας το, μόνο με την χρήση ηλιακής ενέργειας (**Εικόνα 23**).



Εικόνα 2: Το ηλιακό σκάφος MS Turanor PlanetSolar (Πηγή: <https://energypress.gr>).

### 3.3.2 Αιολική ενέργεια

Το ιστιοφόρο είναι το πλοίο που χρησιμοποιεί για την πρόωσή του ιστία, δηλ. πανιά. Μέσα σε λιγότερο από 200 χρόνια, το ιστιοφόρο πλοίο παρουσίασε τρομερή εξέλιξη, όση δεν είχε στα 5.000 χρόνια της ιστορίας του, με αποτέλεσμα να αποκτήσει εξαιρετικές ιδιότητες ευστάθειας και κατευθυντικότητας, καθώς και μεγάλη ταχύτητα και ευκολία χειρισμών, αρετές πολύ σημαντικές για πολεμικά πλοία της εποχής αυτής. Η αιολική ενέργεια φαίνεται αρκετά δελεαστική λύση, διότι το «καύσιμο» είναι άφθονο, αποκεντρωμένο και διατίθεται δωρεάν. Επιπλέον, δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι, και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον υπολογίζονται ως μηδαμινές, συγκρινόμενες με τις λοιπές συμβατικές μορφές ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια στηρίζεται στον άνεμο, ο άνεμος με την σειρά του δημιουργείται λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας του αέρος που δημιουργεί, διαφορές βαρομετρικής πίεσης μεταξύ παρακείμενων τύπων. Αν δυο συνεχόμενες περιοχές παρατηρηθεί να μην έχουν αυτήν την θερμοκρασία τότε η ατμοσφαιρική πίεση της περισσότερης ψυχρής θα είναι μεγαλύτερη της άλλης (της θερμότερης) με αποτέλεσμα να κινηθεί αέρια μάζα από την ψυχρότερη στη θερμότερη περιοχή. Η αιολική ενέργεια έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται πλατιά για ηλεκτροπαραγωγή.

Γενικά οι χρήσεις της αιολικής ενέργειας περιλαμβάνουν εκτός από την ηλεκτροπαραγωγή και την άντληση νερού. Τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται είναι οι ανεμογεννήτριες οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για τα γνωστά αιολικά πάρκα. Κάποια από τα πλεονεκτήματα της χρήσης της αιολικής ενέργειας είναι: η αιολική ενέργεια είναι «άφθονη», αποσυγκεντρωμένη και δωρεάν. Με τη χρήση της δεν ελκύονται αέρια θερμοκηπίου και άλλοι ρύποι και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι μικρές και σε σύγκριση με τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής, η αιολική ενέργεια είναι σήμερα η πιο φθηνή από όλες τις υπάρχουσες ήπιες μορφές. Με τη χρήση της παρέχεται η ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών καθώς μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση για την εξοικονόμηση πετρέλαιο, ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής, ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια

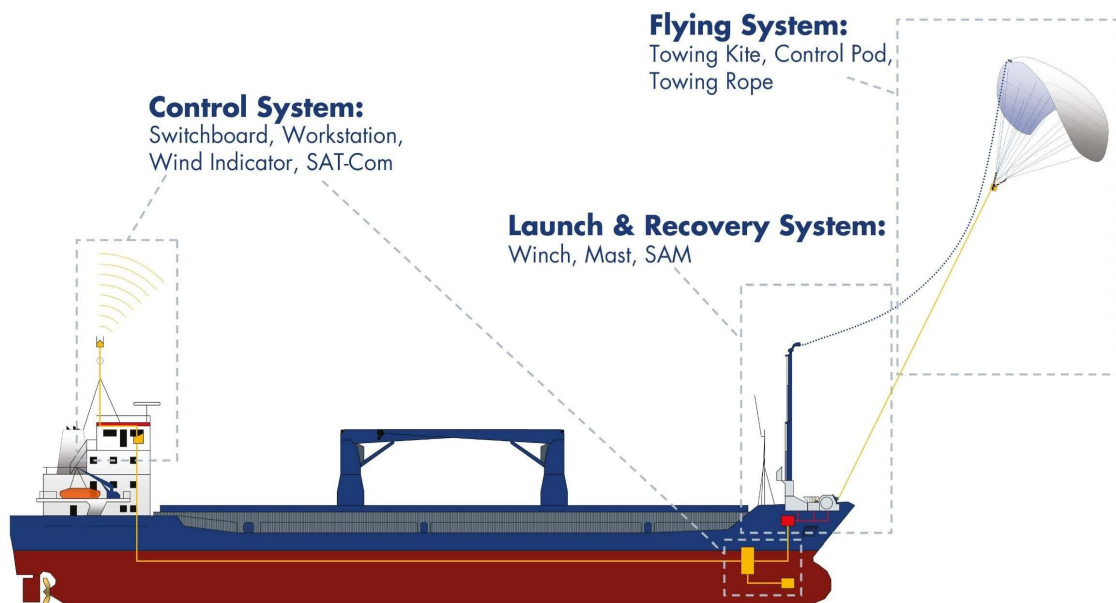
Με τη νέα τεχνολογία, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται με διαφορετικές μορφές.

- *Παραδοσιακά πανιά*

Μια μέθοδος για την παροχή πρόσθετης συμπληρωματικής ισχύος. Ωστόσο, δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμο καθότι το πλοίο ενδέχεται να πάρει κλίση ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και η εξοικονόμηση καυσίμου υπολογίζεται ότι θα έφτανε σε ιδανικές συνθήκες καιρού στο 15% στην ταχύτητα των 15 knots και στο 44% στην ταχύτητα των 10 knots.

- *Αετός*

Απαιτεί πολύπλοκα συστήματα εκτόξευσης, ανάκτησης και ελέγχου. Η χρήση του χαρταετού ρυμούλκησης (**Εικόνα 24**) παράγει υψηλότερη ενέργεια πρόωσης ανά τετραγωνικό μέτρο σε σύγκριση με τα παραδοσιακά αιολικά συστήματα πρόωσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις τεχνικές δυνατότητες που προκύπτουν από τον χωροταξικό διαχωρισμό του πλοίου και του εναέριου πανιού που το ρυμουλκεί. Το εναέριο πανί κατά την χρήση του όχι μόνο δεν δημιουργεί κλίσεις κατά την πλεύση του πλοίου αλλά απεναντίας ελαχιστοποιεί και την υπάρχουσα εάν υπάρχει. Βέβαια και η χρήση του πανιού τύπου χαρταετού δεν μπορεί να αντικαταστήσει την κύρια πρόωση του πλοίου, όμως δρα επικουρικά και εξασφαλίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν επικρατούν ευνοϊκοί άνεμοι. Σύμφωνα με την Skysails (κατασκευάστρια εταιρεία), με τη χρήση αετών μπορεί να επιτευχθεί μια μείωση της κατανάλωσης καυσίμου της τάξεως του 50% υπό καλές καιρικές συνθήκες, με ετήσια μείωση καυσίμου από 10% έως 15%.



Εικόνα 24: Σχηματική παράσταση χρήσης πανιού τύπου χαρταετού και των εξαρτημάτων του (Πηγή: <https://skysails-marine.com/technology.html>).

- *Στέρεα Ιστία και σχήμα πτερυγίου*

Μοιάζουν με φτερά αεροσκαφών και παρέχουν μεγαλύτερη ώθηση με μικρότερη αντίσταση από τα συμβατικά πανιά. Επιτυγχάνουν εξοικονόμηση καυσίμων μέχρι 21% για τα δεξαμενόπλοια, 8,5 % για οχηματαγωγά και 20% για πλοία μεταφοράς αυτοκινήτων.

- *Ρότορες τύπου "Flettner"*

Κατακόρυφοι περιστρεφόμενοι ρότορες, εγκατεστημένοι επί του πλοίου, που μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ώση σε διεύθυνση κάθετη του ανέμου, χρησιμοποιώντας το Φαινόμενο Magnus ή το Φαινόμενο Δυναμικής Άνωσης. Αυτό σημαίνει ότι το πλοίο επωφελείται από την πρόσθετη ώση, με αποτέλεσμα την μειωμένη κατανάλωση καυσίμου.

Η γερμανική εταιρία EMERCON κατασκεύασε το 2010 το πλοίο E-ship1 (**Εικόνα 25**) (μήκους 130 μέτρων), και το οποίο είχε εγκατεστημένους στο κύριο κατάστρωμα τέσσερις (4) ρότορες. Στα εννέα χρόνια λειτουργίας του πλοίου, έχουν διανυθεί περίπου 640.000 ναυτικά μίλια και στα οποία υπολογίζεται μείωση της χρήσης καυσίμων κατά 15% περίπου.

Στοιχεία της εταιρίας αναφέρουν ότι με ιδανικό άνεμο το πλοίο μπορεί να ταξιδεύει μόνο με την χρήση των ρότορων και με ταχύτητα που πλησιάζει τους δώδεκα κόμβους.



Εικόνα 25: Το πλοίο E-ship1 με τους τέσσερις (4) ρότορες (Πηγή: <https://www.vesselfinder.com>)

Επίτευγμα άλλης μιας μεγάλης εταιρίας (Norsepower) στο χώρο της αιολικής ενέργειας αποτελεί η ναυπήγηση του επιβατηγού πλοίου M/S Viking Grace (Εικόνα 26) που από τον Απρίλιο του 2018 κινείται με LNG ως καύσιμο και έχει εγκατεστημένο έναν ρότορα μεσαίας τάξης πλήρως αυτοματοποιημένης λειτουργίας. Τα ετήσια αποτελέσματα παρακολούθησης του πλοίου έδειξαν ότι εξοικονομήθηκαν περί τους τριακοσίους (300) τόνους καύσιμο LNG (Paris Process on Mobility and Climate, 2019).



Εικόνα 26: M/S Viking Grace με τοποθετημένο ρότορα (Πηγή: <https://www.vikingline.com/the-group/viking-line/vessels/ms-viking-grace/>).

- ο *Λίπανση με αέρα*

Ο πεπιεσμένος αέρας παρέχεται μέσα σε μια εσοχή του κάτω μέρους του κύτους του πλοίου. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται η αντίσταση τριβής μεταξύ του νερού και της επιφάνειας της γάστρας, έτσι ώστε να μειώνεται η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης. Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου μέχρι 15% για τα δεξαμενόπλοια, 7,5% για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, 3,5% για τα οχηματαγωγά και μέχρι 8,5 % για τα πλοία μεταφοράς οχημάτων.

### 3.3.3 Κυματική ενέργεια

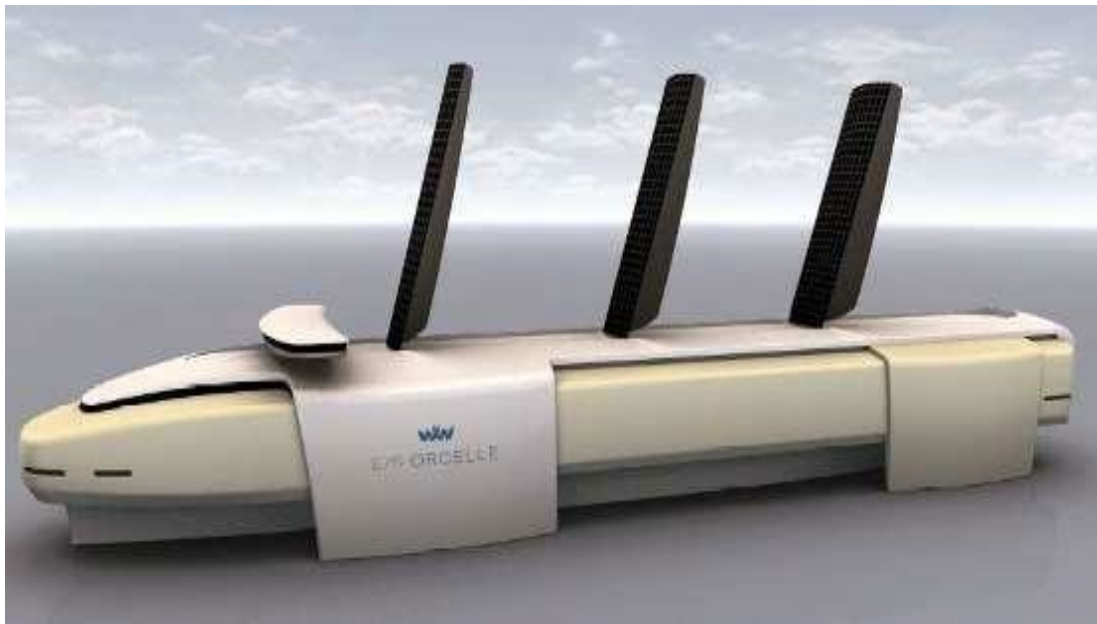
Η ενέργεια από κύματα αναφέρεται στην ενέργεια των κυμάτων στην επιφάνεια του ωκεανού. Είναι αποδεδειγμένο ότι υπάρχουν μεγάλα ενεργειακά ρεύματα στην ανοικτή θάλασσα. Με την εκμετάλλευση τους έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για εκμετάλλευση των κυμάτων. Η ενέργεια των κυμάτων ανοικτής θάλασσας διατίθεται με την μορφή εναλλασσόμενων ανοδικών και καθοδικών κινήσεων του νερού. Από τα κύματα κοντά στην ακτή εκμεταλλευόμαστε την προωστική δύναμη του μετώπου του κύματος για την κίνηση στροβιλοκινητήρων νερού ή αέρα. Κύματα που σπάζουν στην ακτή χρησιμοποιούνται για την πλήρωση φραγμάτων για να παραχθεί στη συνέχεια υδροηλεκτρική ενέργεια.

Όλες οι μέθοδοι είναι φιλικές προς το περιβάλλον δεν συντείνουν στην παραγωγή ενέργειας για την εκπλήρωση των αναγκών μας αλλά ταυτόχρονα δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Επίσης οι ωκεανοί μπορούν να εκμεταλλευθούν για παραγωγή ενέργειας όχι μόνο για τις παλίρροιας και την ενέργεια των κυμάτων αλλά και λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου νερού του πυθμένα μέθοδος η οποία και πάλι είναι φιλική προς το περιβάλλον

Ενδιαφέρον αποτελεί, ως προς το αποτέλεσμα της, η μεγαλεπήβολη σχεδίαση του E/S Orcelle **(Εικόνα 27)** . Πρόκειται για μία σχεδίαση πλοίου μεταφοράς οχημάτων με μηδενικές εκπομπές καυσαερίων. Η εταιρία Wallenius Wilhelmsen Logistics (WWL), επιθυμεί όπως, η ηλιακή ,η αιολική και η κυματική ενέργεια να είναι υπεύθυνες για την κίνηση του πλοίου, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την φόρτιση συστοιχιών μπαταρίας. Η μετατροπή της κυματικής ενέργειας θα επιτευχθεί μέσω δώδεκα (12) πτερυγίων στην γάστρα του πλοίου εμπνευσμένων από τις κινήσεις θαλάσσιων κοιτών και συγκεκριμένα με τις κινήσεις των ουρών των δελφινιών. Τα πτερύγια αυτά θα κινούνται χωρίς να επιφέρουν πρόβλημα στην υδροδυναμική του πλοίου και θα μετατρέπουν την κυματική ενέργεια σε υδροδυναμική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική. Οι πρώτες εργασίες ναυπήγησης του σκάφους ξεκίνησαν το 2004 και οι πιο αισιόδοξοι

προβλέπουν να παραδίδεται στο πλοιοκτήτη περί το έτος 2025. Λόγω των πρωτοποριακών τεχνολογιών αποτελεί ακριβή κατασκευή.



Εικόνα 27: Οι σχεδιαστικές γραμμές του E/S Orcelle (Πηγή: <https://www.marineinsight.com/green-shipping/top-5-zero-emission-ship-concepts/>).

## 3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΛΟΙΩΝ

### 3.4.1 VIKING LADY

Το υπεράκτιο σκάφος προμήθειας Viking Lady (**Εικόνα 28**) ήταν το πρώτο εμπορικό σκάφος που χρησιμοποίησε τεχνολογία κυψελών καυσίμου.

Υποστηρίχθηκε ότι το Viking Lady είναι το πιο φιλικό προς το περιβάλλον σκάφος που κατασκευάστηκε ποτέ. Τον Δεκέμβριο του 2009, το πλοίο ήταν ελλιμενισμένο στο κέντρο της Κοπεγχάγης για να επιδείξει την επιτυχή ενσωμάτωση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου με παραδοσιακά μηχανήματα.



Εικόνα 28: Το “Viking Lady” στα ανοιχτά της βόρειας θάλασσας (Πηγή: <https://www.ship-technology.com/projects/viking-lady>).

Το σκάφος σχεδιάστηκε από την Wartsila Ship Design και κατασκευάστηκε στη δυτική ακτή της Νορβηγίας από τους West Contractors. Έχει ταξινομηθεί ως DNV 1A1 Supply Vessel από τον Det Norske Veritas. Η Viking Lady παραδόθηκε στον ιδιοκτήτη της, Eidesvik Offshore, τον Απρίλιο του 2009. Μετά την παράδοσή της, το πλοίο ναυλώθηκε στη γαλλική εταιρεία πετρελαίου Total.

### **Πρόγραμμα FellowSHIP**

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στο Viking Lady είναι αποτέλεσμα του έργου FellowSHIP, ενός κοινού έργου E & A για την ανάπτυξη τεχνολογίας κυψελών καυσίμου για την προώθηση σκαφών.

Το έργο ξεκίνησε από τους Det Norske Veritas, Eidesvik και Wartsila το 2003. Αναπτύσσεται σε τρεις φάσεις και χρηματοδοτείται από το Συμβούλιο Έρευνας της Νορβηγίας, την Καινοτομία Νορβηγία και το δίκτυο Eureka. Υποστηρίζεται επίσης από το Γερμανικό Ομοσπονδιακό Υπουργείο Οικονομίας και Τεχνολογίας.

Το Viking Lady ήταν το σκάφος που επιλέχθηκε για την έρευνα. Η πρώτη φάση (2003-2006) περιελάμβανε μια μελέτη σκοπιμότητας, ανάπτυξη ιδεών και μελέτες αρχικού σχεδιασμού. Η δεύτερη φάση (2007-2010) ενσωμάτωσε ένα πακέτο ισχύος κυψελών καυσίμου, σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα, ηλεκτρονικά ισχύος και τεχνολογία συστημάτων ελέγχου.



Η κυψέλη καυσίμου εγκαταστάθηκε στο Viking Lady τον Δεκέμβριο του 2009 (**Εικόνα 29**) . Στην τρίτη φάση, θα αναπτυχθεί μια έκδοση υψηλότερης απόδοσης της κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 29: Τοποθέτηση της κυψέλης καυσίμου στο σκάφος (Πηγή: <https://www.ship-technology.com/projects/viking-lady>)

Λόγω της συνδυασμένης χρήσης της κυψέλης καυσίμου και ενός κινητήρα αερίου, μειώθηκαν οι εκπομπές του οξειδίου του θείου κατά 100%, του οξειδίου του αζώτου κατά 85% και του διοξειδίου του άνθρακα κατά 20%.

### 3.4.2 NYK SUPER ECO SHIP 2030

Το NYK SUPER ECO SHIP 2030 (**Εικόνα 30**) το οποίο μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή θα να είναι το πιο οικολογικό φορτηγό πλοίο. Το πλοίο αυτό θα είναι ικανό να ικανοποιήσει την ανάγκη για μείωση εκπομπών μιας και παρά το μήκος των 352 μέτρων θα καταναλώνει 20% λιγότερο καύσιμο από τα αντίστοιχα πλοία ίδιου τύπου και 70% λιγότερους ρύπους CO<sub>2</sub>. Σε αυτό θα βοηθάει και η μείωση του βάρους του άφορτου πλοίου που έχει ένα μοντέρνο σύστημα πρόωσης. Το τεράστιο αυτό πλοίο θα είναι σε θέση να εφαρμόσει τους νέους τρόπους για την παροχή ενέργειας μιας και για την πρόωση του θα χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό από ηλιακή, αιολική ενέργεια και fuel cells. Η έκταση των 31000 τετραγωνικών μέτρων του πλοίου θα είναι καλυμμένη από ηλιακά πάνελ που θα αποδίδουν μέχρι και 9MW που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ελάχιστες απώλειες εξαιτίας της χρήσης υπεραγωγίων υλικών στα καλώδια του ρεύματος. Παράλληλα θα υπάρχουν 8 αναδιπλούμενα πλήρως αυτοματοποιημένα κατάρτια που θα μπορούν να ξεδιπλώνουν πανιά συνολικής επιφάνειας

4000 τετραγωνικών μέτρων τα οποία σε περίπτωση κακοκαιρίας και παρουσία ισχυρών ανέμων θα βοηθούν στην πρόωση. Σε περίπτωση που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν επαρκούν το πλοίο θα χρησιμοποιεί fuel cells υδροποιημένου φυσικού αερίου. Όπως βλέπουμε το πλοίο κάνει ένα συνδυασμό εναλλακτικών τρόπων ενέργειας για τους οποίους μιλήσαμε σε προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης το εσωτερικό και το εξωτερικό του πλοίου θα είναι πρωτοποριακά σχεδιασμένο με στόχο όχι μόνο τη μείωση της αντίστασης της τριβής αλλά και τη μείωση του χρόνου φορτοεκφόρτωσης του κατά την παραμονή του στο λιμάνι.



Εικόνα 30: NYK SUPER ECO SHIP 2030 (Πηγή: <https://www.nyk.com/english/csr/envi/ecoship/>)

### 3.4.3 AURIGA LEADER

Το υβριδικό πλοίο Auriga Leader (**Εικόνα 31**) , κατασκευασμένο στο ναυπηγείο της Nippon Yusen KK στο Κόμππε, πετυχαίνει το στόχο της εξοικονόμησης καυσίμων και τη μείωση της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου αντλώντας μέρος της ενέργειας που χρειάζεται για την κίνηση του από ηλιακούς συλλέκτες ενώ λειτουργεί και με καύσιμο το LNG. Είναι ένα φορηγό πλοίο σχεδιασμένο για τη μεταφορά έως και 6.400 αυτοκινήτων. Στην 200 μέτρων επιφάνεια του πλοίου είναι τοποθετημένα 328 ηλιακά πάνελ πάνελ μπορούν να παράγουν έως και 40 KW ηλεκτρικής ισχύος, η οποία βοηθά στη μείωση την κατανάλωση του κινητήρα του πλοίου εκτελώντας μια σειρά από βοηθητικές λειτουργίες και συνεπώς, τη μείωση των εκπομπών και το κόστος των καυσίμων. Οι ηλιακοί συλλέκτες βοηθούν το πλοίο να εξοικονομήσει περίπου 12 τόνους ντίζελ ανά ταξίδι, ομολογουμένως, ένα κλάσμα της συνολικής ποσότητας των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τα πλοία αυτά.



*Εικόνα 31: Auriga Leader*

## 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία αναλυτική παρουσίαση των διαθέσιμων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου και των εφαρμογών τους στην ναυτιλία. Οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells) είναι η σύγχρονη τάση της τεχνολογίας όσο αναφορά την παραγωγή ενέργειας. Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου βασίζεται στην αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, από την ηλεκτροχημική ένωση του καυσίμου με κάποιο οξειδωτικό μέσο που πραγματοποιείται μέσα στην κυψέλη, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και σχηματισμό νερού (Τεο, 2016). Το συνηθέστερο καύσιμο των κυψελών καυσίμου είναι το υδρογόνο  $H_2$ , ωστόσο γίνονται πειράματα ώστε να λειτουργήσουν και με μονοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες. Εκτός του καυσίμου, απαραίτητο για την χημική αντίδραση είναι και ένα οξειδωτικό μέσο, το οποίο συνήθως είναι το οξυγόνο. Ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης το οξειδωτικό μέσο παρέχεται ξεχωριστά ή προσλαμβάνεται ελεύθερα από την ατμόσφαιρα.

Το υδρογόνο είναι το πιο απλό και το πιο διαδεδομένο στοιχείο στο σύμπαν, και παρέχει τον μεγαλύτερο λόγο ενέργειας προς *βάρος* αποθήκευσης από όλα τα καύσιμα. Ωστόσο, σπάνια βρίσκεται ελεύθερο στη φύση, και άρα απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας για την εξαγωγή του. Το υδρογόνο συνήθως παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας, η βιομάζα και το νερό, με διάφορες διεργασίες (αεριοποίηση, ηλεκτρόλυση, κ.ά.) Μεγάλες μονάδες παραγωγής υδρογόνου μπορούν να κατασκευαστούν για να χρησιμοποιήσουν τις μεθόδους παραγωγής με μετατροπή του φυσικού αερίου, αεριοποίηση άνθρακα και ηλεκτρόλυση. Μεσαίες μονάδες παραγωγής χρησιμοποιούν αεριοποίηση βιομάζας, ηλεκτρόλυση με εναλλακτικές μορφές ενέργειας, φωτόλυση και φωτοβιολογικές μετατροπές. Προς το παρόν, το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής υδρογόνου βασίζεται στην μετατροπή («αναμόρφωση») του φυσικού αερίου, που παράγει μεγάλα ποσά διοξειδίου του άνθρακα (Xing et al, 2021).

Η μεταφορά και αποθήκευση του υδρογόνου επηρεάζεται σημαντικά από την πυκνότητα ενέργειας του στοιχείου. Λόγω της μικρής πυκνότητας ενέργειας για δεδομένο όγκο, απαιτείται μεγαλύτερος όγκος για την αποθήκευση και μεταφορά του, οπότε για πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται συμπιεσμένο ή υγροποιημένο υδρογόνο. Ακόμα κι έτσι, όμως απαιτείται όγκος 10-20 φορές μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο όγκο για τα συνήθη καύσιμα ναυτιλίας, ανάλογα με την πίεση συμπίεσης. Επίσης το υγρό υδρογόνο, απαιτεί ειδικούς κρυστάτες σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία (20 βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν) και αντίστοιχα απαιτεί 4-5 φορές μεγαλύτερο όγκο αποθήκευσης από τα συνήθη ναυτικά καύσιμα., καθώς και επιπλέον χώρο για τον κρυστάτη και σημαντικά ποσά μόνωσης για τη διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας. Οι υψηλή πίεση ή η χαμηλή θερμοκρασία σημαίνουν μεγάλες απαιτήσεις από

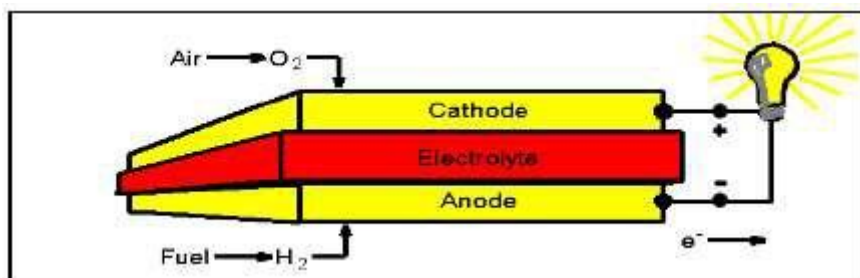
τα πλοία και τις δεξαμενές αποθήκευσης, καθώς και υψηλά κόστη λειτουργίας, οδηγώντας σε μείωση του ωφέλιμου χώρου μεταφοράς φορτίου και μειωμένη ανταγωνιστικότητα για το υδρογόνο σαν καύσιμο.

Το υδρογόνο μπορεί να τροφοδοτήσει απευθείας μηχανές εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου, αλλά έχει την τάση να έχει ανώμαλη ανάφλεξη και να δημιουργεί προβλήματα στους κινητήρες όπου χρησιμοποιείται, οπότε προς το παρόν έχει χρήση μόνο σε κινητήρες διπλής τροφοδοσίας καυσίμου, μαζί με κάποιο συμβατικό καύσιμο. Δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ, ωστόσο ούτε καν πιλοτικά σε εφαρμογές ναυτιλίας. Αντίθετα, κυψέλες καυσίμου με χρήση υδρογόνου έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές φορές σε εφαρμογές ναυτιλίας, όπως θα δούμε παρακάτω. Ωστόσο, οι μηχανές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε μικρά πλοία, γιατί έχουν μικρή απόδοση.

Επιπλέον, προς το παρόν, οι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου έχουν σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, οπότε δεν βοηθούν πολύ στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

Ωστόσο η χρήση **Κυψέλων Καυσίμου (Fuel Cells)** με καύσιμο **υδρογόνο (H<sub>2</sub>)** ή **φυσικό αέριο (LNG)**, θεωρείται ως μία από τις πολλά υποσχόμενες λύσεις, διασφαλίζοντας όχι μόνο μηδενικές εκπομπές, αλλά και υψηλότερη απόδοση των μηχανών των πλοίων. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων, όπως του **υδρογόνου**, του οποίου η παραγωγή δεν υπόκειται σε γεωγραφικούς περιορισμούς, δύναται να οδηγήσει σε αποκεντροποίηση του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, με προφανή οικονομικά οφέλη και για τη ναυτιλία.

Η κυψέλη καυσίμου (**Εικόνα 32**) είναι ένας ηλεκτροχημικός μετατροπέας ενέργειας που μετατρέπει την χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική παράγοντας συνεχή ηλεκτρική τάση. Συνήθως, η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από καύσιμα πραγματοποιείται σε πολλά στάδια ενεργειακών μετατροπών. Πιο συγκεκριμένα: α) μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμότητα μέσω καύσης, β) χρησιμοποίηση της θερμότητας για παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης, γ) χρησιμοποίηση του ατμού για τη λειτουργία ενός στρόβιλου, όπου η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική – περιστροφική και δ) μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας. Η κυψέλη καυσίμου παρακάμπτει όλες τις παραπάνω μετατροπές, αφού παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω μόνο ενός σταδίου, χωρίς να εμπλέκονται κινούμενα μέρη κατά τη διαδικασία της μετατροπής αυτής.



Εικόνα 32: Η κυψέλη καυσίμου παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση απευθείας από καύσιμο

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου μοιάζει με αυτή ενός ηλεκτροχημικού συσσωρευτή. Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Σε αντίθεση με έναν ηλεκτροχημικό συσσωρευτή, μια κυψέλη καυσίμου απαιτεί συνεχή τροφοδοσία καυσίμου και οξυγόνου. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρόδια της κυψέλης δεν υποβάλλονται σε αλλαγές ως προς τη χημική τους σύσταση. Οι μπαταρίες, ως γνωστόν, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η πραγματοποίηση αυτών των αντιδράσεων βασίζεται σε αντιδρώντα στοιχεία, τα οποία ήδη υπάρχουν μέσα στους συσσωρευτές. Εξαιτίας αυτού, οι μπαταρίες εκφορτίζονται, όταν τα αντιδρώντα εξαντλούνται. Μία κυψέλη καυσίμου δε μπορεί να «εκφορτιστεί» εφόσον το καύσιμο και το οξυγόνο τροφοδοτούνται διαρκώς. Τυπικά αντιδρώντα στοιχεία για τις κυψέλες καυσίμου είναι το υδρογόνο και το οξυγόνο, όχι κατά ανάγκη υψηλής καθαρότητας. Το υδρογόνο ως καύσιμο μπορεί να παρουσιάζεται είτε ως μίγμα με άλλα αέρια (όπως  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ), είτε υπό μορφή υδρογονανθράκων όπως το φυσικό αέριο,  $CH_4$ , είτε σε μορφή υγρών υδρογονανθράκων όπως μεθανόλη,  $CH_3OH$ . Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει αρκετό οξυγόνο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις κυψέλες καυσίμου. Τέλος, τα προϊόντα που παράγονται από την ηλεκτροχημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα μέσα στην κυψέλη καυσίμου είναι νερό και αρκετή ποσότητα θερμότητας.

## 4.2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Αν και οι κυψέλες καυσίμου είναι ένα σύγχρονο τεχνολογικό επίτευγμα, η αρχή λειτουργίας τους ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Sir William Grove. Ο Francis T. Bacon ξεκίνησε να εργάζεται πάνω στις κυψέλες καυσίμου το 1937, προκειμένου οι διατάξεις αυτές να αποκτήσουν μια πιο πρακτική εφαρμογή. Μετά από συνεχείς προσπάθειες ανέπτυξε μια συστοιχία κυψελών καυσίμου ονομαστικής ισχύος 6 kW στα τέλη τις δεκαετίας του 1950. Παρόλα αυτά, η πρώτη ουσιαστική εφαρμογή των Κυψελών καυσίμου έγινε σε ένα σύστημα στο πλαίσιο διαστημικού προγράμματος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Η εταιρία General Electric ανέπτυξε κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Gemini στις αρχές του 1960. Στη συνέχεια ακολούθησε το διαστημικό πρόγραμμα Apollo, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες καυσίμου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την κάλυψη των ανθρώπινων καθώς και τηλεπικοινωνιακών αναγκών στο δορυφόρο. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου κατασκευάστηκαν από τους Pratt και Whitney, και βασίστηκαν στην ιδέα του Bacon. Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 η εταιρία General Motors κατασκεύασε ένα πειραματικό φορτηγό όχημα με κυψέλες καυσίμου. Το 1989 η εταιρία Perry Energy Systems σε συνεργασία με την Ballard κατασκεύασαν ένα υποβρύχιο, που τροφοδοτούνταν από συστοιχία κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Το 1993 η εταιρία Ballard παρουσίασε αστικά λεωφορεία που τροφοδοτούνταν από κυψέλες καυσίμου. Η Energy Partners, μια θυγατρική της Perry Energy Systems δημιούργησε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου το 1993. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες υποστηριζόμενες από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α., περί τα τέλη του προηγούμενου αιώνα κατασκεύασαν πειραματικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούσαν την τεχνολογία κυψελών καυσίμου.

### 4.3 ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που διαθέτουν. Έτσι έχουμε :

- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)
- Κυψέλες καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEFC).
- Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC),
- Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC),
- Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Ένα άλλος τρόπος διάκρισης είναι η θερμοκρασία λειτουργίας. Χαμηλής θερμοκρασίας είναι οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC). Μεσαίας θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), ενώ υψηλής θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) και οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).

Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, χρησιμοποιούν ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο. Η παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αερίων που περιέχουν θείο (S) στην ροή του καυσίμου, προκαλούν την καταστροφή της ανόδου και υποβάθμιση της λειτουργίας της κυψέλης. Στις κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, δηλαδή στερεών οξειδίων (SOFC) και τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), μια ευρύτερη ποικιλία καυσίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί επειδή, αφ' ενός μεν η χημική διεργασία στο ηλεκτρόδιο είναι εντονότερη, αφ' ετέρου δε η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας μειώνει την ανάγκη ηλεκτροκαταλυτικής δράσης. Επίσης σε αυτές τις κυψέλες, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, η επεξεργασία του καυσίμου μπορεί να γίνει εσωτερικά στην κυψέλη και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας άλλα καύσιμα που περιέχουν υδρογονάνθρακες.

Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), καθορίζεται από το σημείο τήξεως του ηλεκτρολύτη, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), καθορίζεται από την ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Στις κυψέλες καυσίμου χαμηλής πίεσης, τα αρχικά φορτία είναι είτε πρωτόνια (θετικό φορτίο), είτε ιόντα υδροξυλίου (αρνητικό φορτίο), ενώ στις κυψέλες υψηλής πίεσης τα αρχικά φορτία είναι ιόντα άνθρακα και όξινα ιόντα.

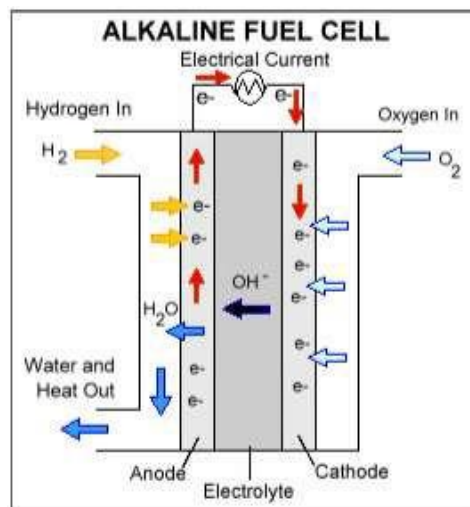


### 4.3.1 Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (AFC)

Στην αλκαλική κυψέλη καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου (KOH), λόγω της υψηλής αγωγιμότητας των ιόντων υδροξυλίου. Η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες 60-100°C και σε πίεση ατμοσφαιρική. Τυπική πυκνότητα ισχύος είναι 0.2-0.3W/cm<sup>2</sup>.

Οι προβλεπόμενες ώρες λειτουργίας της είναι πάνω από 10000 ώρες, ενώ το κόστος της προβλέπεται να είναι 200\$/kW. Το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο.

Η δομή της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου (AFC) φαίνεται παρακάτω. **(Εικόνα 33)**



Εικόνα 33: Αλκαλική Κυψέλη καυσίμου.

Οι κυψέλες αυτού του τύπου χρησιμοποιούν διάλυμα υδροξείδιου του καλίου, ως ηλεκτρολύτη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία πολύτιμων ή μη, μετάλλων ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο. Έτσι στην άνοδο ο καταλύτης μπορεί να είναι από νικέλιο (Ni) ή λευκόχρυσο (Pt), ενώ στην κάθοδο ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο (Pt) ή οξείδια του νικελίου. Μεταξύ των αντιδράσεων στην άνοδο και την κάθοδο, η αντίδραση της καθόδου είναι η πιο αργή, αφού χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να πραγματοποιηθεί, από αυτή της ανόδου. Παρόλα αυτά στην αλκαλική κυψέλη καυσίμου, η αντίδραση στο ηλεκτρόδιο της καθόδου, πραγματοποιείται πολύ πιο γρήγορα από ότι στους άλλους τύπους κυψελών, με αποτέλεσμα η τάση λειτουργίας κάθε κυψέλης να φτάνει τα 0.875V, αρκετά υψηλότερη από τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου.

Όπως και στις PEM, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, συνήθως μεταξύ 70-90°C, τους δίνει το πλεονέκτημα της γρήγορης εκκίνησης. Λόγω όμως αυτής της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, είναι ζωτικής σημασίας οι μέθοδοι απομάκρυνσης του νερού και της θερμότητας. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα είναι η ευαισθησία της στο διοξείδιο του άνθρακα. Έτσι η αλκαλική κυψέλη καυσίμου, δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ατμοσφαιρικό αέρα, για την

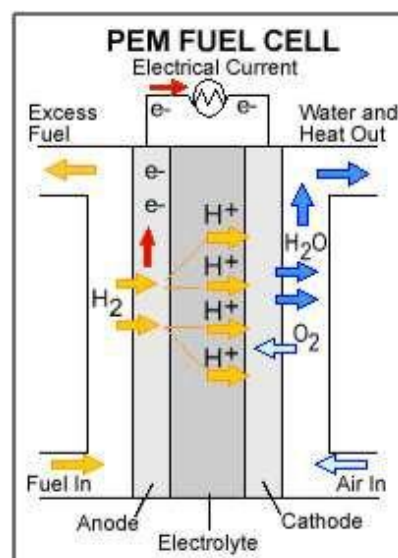
παροχή του απαραίτητου οξυγόνου στην κάθοδο. Χρειάζεται ειδικό σύστημα, το οποίο να απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα από την εισαγωγή του αέρα. Η χρήση διαβρωτικού ηλεκτρολύτη είναι ένα ακόμα μειονέκτημα. Ο ηλεκτρολύτης διαβρώνει τα υλικά γύρω του, με αποτέλεσμα την μείωση της διάρκειας ζωής της κυψέλης και την αύξηση του κόστους της. Στην αύξηση του κόστους της συντελεί και η χρήση ακριβού καταλύτη όπως ο λευκόχρυσος. Η χρησιμοποίηση λιγότερο ακριβών καταλυτών όπως ο άνθρακας και ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από οξειδία μετάλλων, είναι υπό διερεύνηση.

### 4.3.2 Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), γνωστή και ως κυψέλη καυσίμου στερεού πολυμερούς (SPFC), χρησιμοποιεί στερεή πολυμερή μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Η μεμβράνη βρίσκεται μεταξύ δυο πορωδών ηλεκτροδίων, την άνοδο και την κάθοδο, στα οποία ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ των 50-100 °C και η πίεση ατμοσφαιρική ή λίγο μεγαλύτερη. Η πυκνότητα ισχύος είναι 0.35-0.6 W/cm<sup>2</sup>. Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της είναι περισσότερο από 40000 ώρες και το κόστος της εκτιμάται ότι θα είναι 200\$/kW. Το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, αλλά με τη χρήση εξωτερικού αναμορφωτή καυσίμου, μπορούν να χρησιμοποιήσουν φυσικό αέριο ή βενζίνη.

Η δομή της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 34: Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

Ο πολυμερής ηλεκτρολύτης όπως το Nafion, είναι κατασκευασμένος σαν μια μεμβράνη πάχους περίπου 175μm και έχει την όψη ενός καθαρού χαρτιού περιτυλίγματος από σελοφάν. Όταν έχει την κατάλληλη υγρασία, άγει τα θετικά ιόντα (πρωτόνια υδρογόνου) και μπλοκάρει τα αρνητικά. Τα αρνητικά ιόντα τότε (ηλεκτρόνια), πρέπει να ακολουθήσουν έναν αγώγιμο δρόμο, για να κλείσουν το κύκλωμα γύρω από το πολυμερές. Ο καταλύτης είναι αναγκαίος για την επιτάχυνση της αντίδρασης οξειδωσης και αναγωγής στα ηλεκτρόδια. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, ο καταλύτης πρέπει να είναι από λευκόχρυσο (Pt).

Πλεονέκτημα της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος. Έχει τη μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από όλους τους τύπους κυψελών, με εξαίρεση ίσως την αλκαλική κυψέλη καυσίμου. Η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη μειώνει τη διάβρωση που υφίστανται τα υλικά και επιπλέον δεν απαιτείται ειδική διαχείριση των υγρών, που είναι απαραίτητη όταν υπάρχουν υγροί ηλεκτρολύτες.

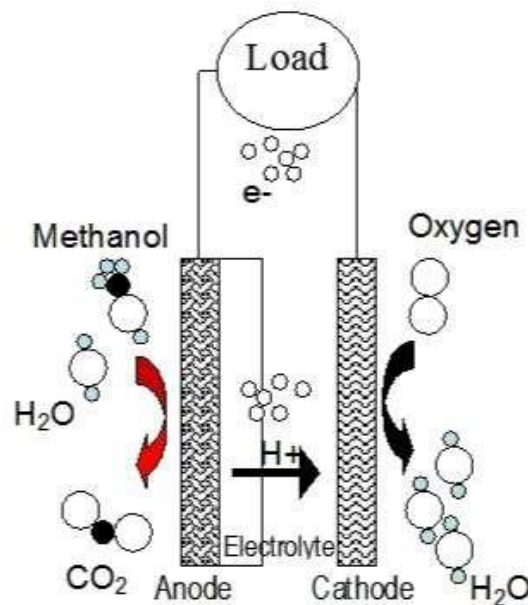
Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η μικρή θερμοκρασία λειτουργίας. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, υπάρχει η δυνατότητα της γρήγορης εκκίνησης, κάνοντας τις PEM κατάλληλες για εφαρμογή στα ηλεκτρικά οχήματα. Ελκυστικό χαρακτηριστικό είναι επίσης η μεγάλη διάρκεια ζωής.

Η χρήση του λευκόχρυσου ως καταλύτη είναι από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, λόγω του μεγάλου κόστους του πολύτιμου μετάλλου. Βέβαια η ποσότητα του λευκόχρυσου που απαιτείται, μειώθηκε ραγδαία την τελευταία δεκαετία, αλλά χρειάζεται περεταίρω έρευνα έτσι ώστε οι PEM να γίνουν ανταγωνιστικές. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η ευαισθησία της κυψέλης καυσίμου στο μονοξειδίο του άνθρακα. Για τη αντιστάθμιση του προβλήματος αυτού, η κατασκευή γίνεται πολυπλοκότερη.

### 4.3.3 Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC)

Ο τύπος αυτός είναι νέος σε σχέση με τις υπόλοιπες κυψέλες καυσίμου. Είναι υβρίδιο της PEM, αλλά αντί υδρογόνου, χρησιμοποιεί μεθανόλη ως καύσιμο. Η θερμοκρασία λειτουργίας της είναι μεταξύ 50-100°C, σε ατμοσφαιρική πίεση και δίνει πυκνότητα ισχύος 0.04-0.23 W/cm<sup>2</sup>. Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι πάνω από 10000 ώρες και το κόστος της προβλέπεται να είναι 200\$/kW.

Η δομή της κυψέλης καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC), είναι **(Εικόνα 35)**:



*Εικόνα 35: Κυψέλη Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης.*

Ο ηλεκτρολύτης είναι μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), έχει όμως μεγαλύτερο πάχος. Ο καταλύτης στην άνοδο είναι διμεταλλικός από λευκόχρυσο και στη κάθοδο λευκόχρυσος. Στην άνοδο, ο καταλύτης από μόνος τους έλκει το υδρογόνο, από το υγρό μεθάνιο [16].

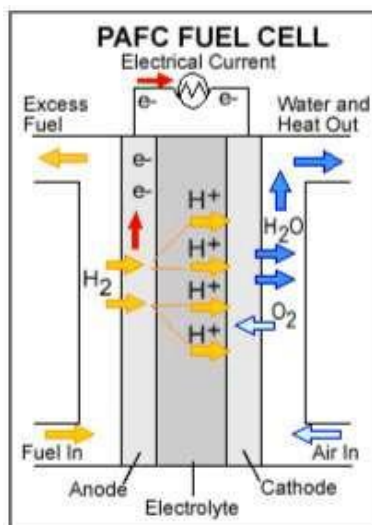
Η κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC), έχει παρόμοια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με την κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Δεν χρειάζεται όμως αναμορφωτή για τη λειτουργία της, γεγονός που μειώνει το κόστος. Η μεθανόλη είναι το απλούστερο οργανικό καύσιμο, το οποίο πολύ οικονομικά και αποδοτικά μπορεί να παραχθεί σε μεγάλη κλίμακα, από καύσιμα όπως το κάρβουνο και το φυσικό αέριο. και είναι πολύ εύκολη η αποθήκευση η διανομή της, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τομείς όπου το υδρογόνο πάσχει .

Το σημαντικότερο μειονέκτημα οφείλεται στην αργή αντίδραση της ανόδου, όπου η οξείδωση της μεθανόλης, είναι πολυπλοκότερη από αυτή του υδρογόνου και πραγματοποιείται πολύ αργά. Αυτό έχει αποτέλεσμα η ισχύς να είναι πολύ μικρή, σε σχέση με το μέγεθος της κυψέλης.

#### 4.3.4 Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, χαρακτηρίζεται από τον ηλεκτρολύτη ο οποίος είναι αγωγίμος στα ιόντα του υδρογόνου, ενώ ο καταλύτης στην άνοδο και την κάθοδο είναι από λευκόχρυσο ή κράματα λευκόχρυσου. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 150°C και 210°C και η πίεση ατμοσφαιρική ή λίγο μεγαλύτερη. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.2 – 0.25 W/cm<sup>2</sup>, η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40000 ώρες και το κόστος της προβλέπεται να είναι μεγαλύτερο των 1000\$/kW. Το καύσιμο, εκτός από υδρογόνο, μπορεί να είναι φυσικό αέριο ή μεθανόλη σε συνδυασμό με αναμορφωτή καυσίμου.

Η δομή της κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) φαίνεται παρακάτω (**Εικόνα 36**).



Εικόνα 36 Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος.

Στην αρχή της εξελίξεώς τους, πολλοί διαφορετικοί τύποι οξέων δοκιμάζονταν για ηλεκτρολύτες, όπως το θειικό οξύ, τα υπερχλωρικά οξέα και το φωσφορικό οξύ. Τελικά επικράτησε το φωσφορικό οξύ, κυρίως λόγω της ανοχής του στο CO<sub>2</sub> που βρίσκεται στο καύσιμο και στο οξειδωτικό μέσο. Επιπλέον είναι σταθερό κατά τη λειτουργία της κυψέλης σε υψηλές θερμοκρασίες και έχει μεγάλη αγωγιμότητα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C. Το φωσφορικό οξύ είναι άχρωμο παχύρευστο υγρό. Χρησιμοποιείται στις κυψέλες καυσίμου από το 1980 και έχει σημείο πήξεως στους 42°C. Για την προστασία της κυψέλης καυσίμου από το ψύχος θα πρέπει η θερμοκρασία να διατηρείται πάνω από αυτό το όριο. Το φωσφορικό οξύ πλαισιώνεται από πορώδες ανθρακικό υλικό, το οποίο είναι καλυμμένο με Teflon, που το συγκρατεί, κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων, διευκολύνει την παροχή των αερίων στις επιφάνειες αντίδρασης, αλλά και την διαφυγή τους από τον ηλεκτρολύτη. Η θερμοκρασία λειτουργίας της PAFC είναι διπλάσια από ότι της PEM. Η υψηλή αυτή θερμοκρασία είναι αναγκαία λόγω του νερού που παράγεται ως παραπροϊόν. Εάν η θερμοκρασία ήταν

χαμηλότερη, αυτό θα διαλυόταν στον ηλεκτρολύτη. Έτσι η θερμοκρασία πρέπει να είναι αρκετά υψηλή έτσι ώστε το νερό να εξέρχεται της κυψέλης υπό μορφή ατμού. Η θερμοκρασία δεν μπορεί να είναι υπερβολικά υψηλή καθώς το φωσφορικό οξύ αποσυντίθεται μετά τους 210°C. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της PAFC είναι η ανθεκτικότητά της στις ακαθαρσίες που υπάρχουν στο καύσιμο που παράγεται με αναμόρφωση των υδρογονανθράκων. Αυτός ήταν και ο λόγος για τον οποίο επιλέχτηκε η ουσιαστική ανάπτυξη της PAFC, στα πρώτα βήματα. Η ικανότητα λειτουργίας της με "ακάθαρτο" καύσιμο, την κάνει φθηνότερη από τους υπόλοιπους τύπους κυψελών καυσίμου, καθώς μειώνεται το κόστος του αναμορφωτή. Το μειωμένο κόστος επεξεργασίας του καυσίμου μειώνει με τη σειρά του το κόστος όλης της μονάδας PAFC και της δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί και άλλα καύσιμα, προερχόμενα είτε από τα αέρια των χωματερών (μεθάνιο CH<sub>4</sub>) είτε από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και επεξεργασίας λυμάτων. Σε μια τέτοια περίπτωση χρήσης κάποιου άλλου καυσίμου, η μοναδική αλλαγή που απαιτείται είναι μικρές προσαρμογές στο σύστημα επεξεργασίας και παροχής του καυσίμου. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι η τεχνολογία γύρω από την PAFC είναι η πλέον ώριμη, σε επίπεδο ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης. Ο συγκεκριμένος τύπος αναπτύσσεται για περισσότερο από 20 χρόνια. Έτσι, όπως και με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, το κόστος έχει μειωθεί ενώ η απόδοση αυξάνεται.

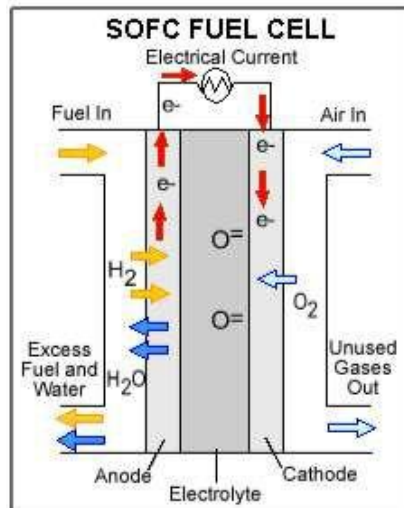
Η δυνατότητα συμπαραγωγής λόγω της λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες, κάνει την PAFC αποδοτικότερη από τις κυψέλες καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών.

Μειονέκτημα της PAFC, όπως και στην PEM, είναι η χρήση του πολύ ακριβού λευκόχρυσου ως καταλύτη, το οποίο αυξάνει το συνολικό κόστος. Η υψηλή θερμοκρασία είναι ταυτόχρονα και μειονέκτημα, καθώς υπάρχει περίοδος αναμονής, μέχρι η κυψέλη να ζεσταθεί και να λειτουργήσει σωστά. Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, παράγει σχετικά μικρή πυκνότητα ρεύματος και ισχύος και έχει μεγάλο μέγεθος. Οι κυψέλες αυτές είναι αρκετά μεγάλες και βαριές. Συνεπώς είναι δύσκολη η χρησιμοποίησή τους σε οχήματα και σε κινητές εφαρμογές.

### 4.3.5 Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC)

Η κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων, είναι εξ ολοκλήρου στερεή κατασκευή. Ο ηλεκτρολύτης είναι μη πορώδες κεραμικό υλικό, αγωγίμο στα ανιόντα του οξυγόνου, που διέρχονται από το πλέγμα του κρυστάλλου. Για το λόγω αυτό είναι πιο απλή από τα υπόλοιπα συστήματα κυψελών καυσίμου. Ο ηλεκτρολύτης είναι κράμα υπτρίας ( $Y_2O_3$ ) και ζirkονίου, η άνοδος είναι κεραμικό μίγμα νικελίου και ζirkονίου και η κάθοδος είναι μαγγανίτης λανθανίου στρόντιου. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ  $800^{\circ}C$  και  $1100^{\circ}C$  και η πίεση ατμοσφαιρική. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι  $0.24 - 0.3 W/cm^2$ , η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40.000 ώρες και το κόστος εκτιμάται ότι θα ανέρχεται στα 1500\$/kW. Μπορεί να χρησιμοποιήσει σαν καύσιμο, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογονάνθρακες και σαν οξειδωτικό μέσο αέρα ή οξυγόνο

Η δομή της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) φαίνεται παρακάτω (**Εικόνα 37**).



*Εικόνα 37: Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου.*

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πολύτιμων μετάλλων για τον καταλύτη. Όπως και στην MCFC, το καύσιμο μπορεί να είναι τόσο υδρογόνο, όσο και μονοξειδίο του άνθρακα. Λειτουργώντας παρόμοια με την MCFC, τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου, μεταφέρονται από την κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη στην άνοδο. Έτσι το παραγόμενο νερό σχηματίζεται στην άνοδο. Η SOFC αναπτύσσεται από το 1899, όταν ο Nerst πρώτος περιέγραψε το οξείδιο του ζirkονίου ( $ZrO_2$ ), σαν αγωγό των ανιόντων του οξυγόνου. Όλες οι SOFC βασίζονται στον ηλεκτρολύτη από ζirkόνιο, με προσθήκη μικρού ποσοστού υπτρίας ( $Y_2O_3$ ). Σε θερμοκρασίες περί των  $800^\circ C$ , το ζirkόνιο γίνεται αγωγός των ανιόντων του οξυγόνου. Η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας μίας κυψέλης SOFC είναι μεταξύ  $800^\circ C$  και  $1100^\circ C$ . Αυτή είναι και η υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας απ όλες τις κυψέλες καυσίμου, με αποτέλεσμα η κατασκευή και η διάρκεια ζωής τους να είναι πρόκληση μα συνάμα και ευκαιρία για τη χρήσης της κυψέλης καυσίμου σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Στην κάθοδο χρησιμοποιείται μαγγανίτης λανθανίου ποτισμένο με στρόντιο. Η άνοδος είναι κεραμικό μείγμα ζirkονίου ( μείγμα ζirkονίου και μετάλλου, συνήθως νικελίου). Η επιλογή του νικελίου γίνεται λόγω της υψηλής ηλεκτρικής του αγωγιμότητας και της σταθερότητας του κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων. Η χρησιμοποίηση του νικελίου και ως καταλύτη αναμόρφωσης, σε συνδυασμό με την υψηλή θερμοκρασία, δίνει το πλεονέκτημα της εσωτερικής αναμόρφωσης μέσα στην SOFC, κατευθείαν στην άνοδο. Λειτουργώντας στους  $1000-1100^\circ C$ , τα στερεά οξείδια σχηματίζουν ιόντα υδρογόνου, τα οποία άγονται προς τη ροή του καυσίμου, όπου αντιδρούν με το μονοξειδίο του άνθρακα (CO) και το υδρογόνο ( $H_2$ ), ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Αυτή η διαδικασία είναι αντίθετη με το τι συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, στις οποίες το υδρογόνο ( $H_2$ ) κατευθύνεται προς τα ηλεκτρόδια και μετά προς την πηγή του οξυγόνου ( $O_2$ ). Αυτή η διαφορά, σε συνδυασμό με τη σταθερότητα των στερεών οξειδίων, επιτρέπει στα συστήματα SOFC να εξαλείψουν την ανάγκη προσθήκης επεξεργαστή καυσίμου και συνεπώς να είναι πιο ευέλικτα από τα συστήματα MCFC, ως προς τον τύπο του καυσίμου που τροφοδοτούνται. Επιπλέον, τα συστήματα SOFC μπορούν να επιτύχουν ακόμα μεγαλύτερες "πυκνότητες" ισχύος, αφού τα στερεά οξείδια έχουν την δυνατότητα να σχηματίζονται σε μεγάλη ποικιλία μορφών και σχημάτων.

Καθώς οι συμβατικές υψηλής θερμοκρασίας SOFC, λειτουργούν συνήθως μεταξύ  $800^\circ C$  και  $1000^\circ C$ , οι έρευνες επικεντρώνονται στις μεσαίας θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (IT-SOFC, Intermediate Temperature SOFC). Αυτές λειτουργούν μεταξύ  $550^\circ C$  και  $800^\circ C$ , προσφέροντας ευρύτερη γκάμα υλικών κατασκευής και πιο οικονομική κατασκευή της ίδιας της κυψέλης. Η υψηλής θερμοκρασίας SOFC είναι εξ ολοκλήρου κατασκευασμένη από κεραμικά υλικά, ενώ η IT-SOFC αποτελείται από κεραμικά και μεταλλικά υλικά και χρησιμοποιεί συνδέσεις από ανοξειδωτο ασάλι αντί του πολύ ακριβού κράματος χρωμίου. Οι βασικοί σχεδιασμοί της SOFC είναι δύο, είτε με βάση τον ηλεκτρολύτη είτε με βάση τα ηλεκτρόδια.



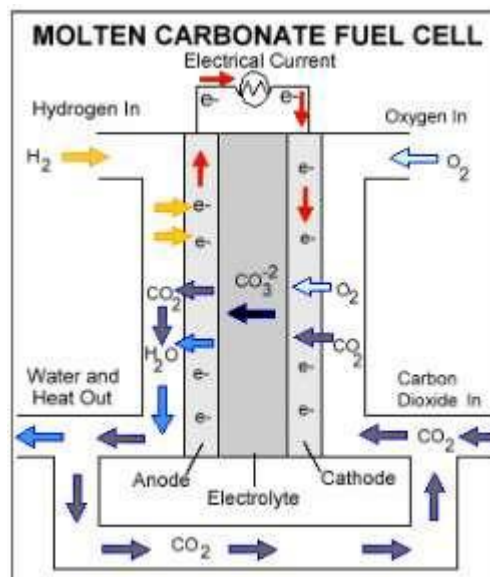
Στην πρώτη περίπτωση ο ηλεκτρολύτης είναι μεγάλο εξάρτημα και αποτελεί τη βάση της κατασκευής. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται μόνο στις υψηλές θερμοκρασίες, όπου οι συχνά μεγάλες ωμικές απώλειες μπορούν να μειωθούν. Στη δεύτερη περίπτωση, οι κυψέλες κατασκευάζονται με σκοπό τη μείωση των ωμικών απωλειών στις χαμηλότερες θερμοκρασίες, όπως είναι οι IT-SOFC. Σε αυτές τις κυψέλες ένα από τα δύο ηλεκτρόδια είναι το μεγαλύτερο εξάρτημα και στηρίζει την κατασκευή, ενώ ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα και να είναι λεπτός. Παραταύτα παρατηρείται ότι παρόλο την μικρή ωμική συνεισφορά, η ωμική αντίσταση των IT-SOFC είναι μεγαλύτερη από αυτή των κυψελών υψηλών θερμοκρασιών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υπέρταση λόγω ενεργοποίησης και συγκέντρωσης, οι οποίες συχνά υπερακοντίζουν την ωμική συνεισφορά.

Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας δίνει το πλεονέκτημα στην SOFC, έναντι στις χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. Η υψηλή θερμοκρασία αυξάνει τον βαθμό απόδοσης της κυψέλης και δίνει τη δυνατότητα της χρησιμοποίησης λιγότερου ακριβού καταλύτη απ' ό,τι οι κυψέλες χαμηλών θερμοκρασιών, αφού με την αύξηση της θερμοκρασίας, οι χημικοί δεσμοί σπάνε γρηγορότερα. Η μεγάλη θερμοκρασία των SOFC, δίνει το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης περισσοτέρων τύπων καυσίμου. Με αυτά τα καύσιμα η αναμόρφωση μπορεί να γίνει στο εσωτερικό της κυψέλης και όχι με τη χρήση ξεχωριστής εξωτερικής συσκευής αναμόρφωσης, μειώνοντας το συνολικό κόστος. Η υψηλή θερμοκρασία χρησιμοποιείται επίσης για συμπαραγωγή ενέργειας και θερμότητας, αυξάνοντας το βαθμό απόδοσης του συστήματος. Με τη χρησιμοποίηση στερεού ηλεκτρολύτη, εκλείπουν τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης που έχουν οι υγροί ηλεκτρολύτες. Έτσι το σύστημα γίνεται απλούστερο και πιο οικονομικό. Η υψηλή θερμοκρασία όμως επιταχύνει τη φθορά των εξαρτημάτων της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής της κυψέλης.

### 4.3.6 Κυψέλες Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC)

Στις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως τήγμα αλκαλικού μετάλλου ανθρακικού άλατος (λιθίου, ποτάσας ή νατρίου), το οποίο συγκρατείται σε κεραμική μήτρα. Η άνοδος είναι κράμα νικελίου-χρωμίου και η κάθοδος οξειδίο του νικελίου. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 600°C και 700°C και η πίεση ατμοσφαιρική. Η παραγόμενη πυκνότητα ισχύος είναι 0.1 – 0.2 W/cm<sup>2</sup>, η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 40 000 ώρες και το κόστος εκτιμάται ότι θα ανέρχεται στα 1000\$/kW.

Η δομή της κυψέλης καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 38).



Εικόνα 38: Κυψέλη Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων.

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), έχουν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι για να λειτουργήσουν χρειάζονται οπωσδήποτε το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που περιέχεται στον αέρα. Επειδή λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία μπορούν, όπως και οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), να αναμορφώσουν εσωτερικά τα αέρια όπως το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), το οποίο συνδυάζουν με ατμό (H<sub>2</sub>O(g)) για να σχηματίσουν ένα πλούσιο σε υδρογόνο καύσιμο. Παρ' όλο που η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει την ύπαρξη άνθρακα στην κυψέλη, το θείο (S) μπορεί να την "δηλητηριάσει", ακόμα και σε μικρές ποσότητες.

Το κύριο πρόβλημα με τη λειτουργία και κατασκευή των κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) σχετίζεται με τον σχεδιασμό και την κατασκευή των ηλεκτροδίων τους, τα οποία χρησιμοποιούν καταλύτη από νικέλιο. Τα ηλεκτρόδια αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά στο θερμό και οξειδωτικό περιβάλλον του ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι ένα μίγμα

αποτελούμενο κατά 68% από ανθρακικό λίθιο ( $K_2CO_3$ ) και 32% από υδροξείδιο του καλίου (ΚΟΗ). Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυτού, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμένο κύκλο φτάνει το 50%.

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας με τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων.

## 4.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ & ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή τεχνολογία με πληθώρα πιθανών εφαρμογών, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν σε σύγκριση με τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας.

Αναλυτικότερα:

α) Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν υψηλότερο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις θερμικές μηχανές. Οι θερμικές μηχανές, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης, οι ατμοστρόβιλοι και οι αεριοστρόβιλοι, μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε θερμότητα και στη συνέχεια σε μηχανικό έργο. Ο βέλτιστος θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης (Carnot) μιας θερμικής μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Efficiency}_{\max} = 1 - (T_2/T_1)$$

όπου:

$T_1$  = Απόλυτη θερμοκρασία εισερχόμενου (θερμού) αερίου  $T_2$  = Απόλυτη θερμοκρασία εξερχόμενου (ψυχρού) αερίου

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου και όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου, τόσο μεγιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης. Επομένως, θεωρητικά, καθώς αυξάνουμε την θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου μπορούμε να πετύχουμε οποιονδήποτε βαθμό απόδοσης, αφού η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου δεν μπορεί να είναι χαμηλότερη από εκείνη του περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά, σε πραγματικές μηχανές εσωτερικής καύσης η θερμοκρασία εισόδου της μηχανής είναι η θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής, η οποία είναι πολύ μικρότερη από τη θερμοκρασία ανάφλεξης. Αφού στις κυψέλες καυσίμου δεν πραγματοποιείται καύση, η απόδοσή τους δεν σχετίζεται με την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι ο βαθμός απόδοσης κατά τη μετατροπή ενέργειας (ηλεκτροχημική αντίδραση σε σχέση με την καύση) γίνεται σημαντικά μεγαλύτερος στις κυψέλες καυσίμου.

β) Οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων και τα μόνα «καυσαέρια» που εκλύουν είναι ο αχρησιμοποίητος αέρας και το νερό. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς, σε εσωτερικούς χώρους και στα υποβρύχια. Παρόλα αυτά όμως το υδρογόνο δεν είναι ένα στοιχείο που το συναντούμε ελεύθερο στη φύση. Επομένως σε μερικές εφαρμογές απαιτείται ένα προστάδιο

επεξεργασίας καυσίμου με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου από μεθανόλη. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν εκπομπές κάποιων καυσαερίων μεταξύ των οποίων και διοξείδιο του άνθρακα. Γενικά αυτές οι εκπομπές είναι χαμηλότερες σε σχέση με εκείνες που προέρχονται από τις συμβατικές τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας.

γ) Οι κυψέλες καυσίμου διαθέτουν μια απλή δομή. Αποτελούνται από στρώσεις επαναλαμβανόμενων στοιχείων και δεν έχουν κινούμενα μέρη. Εξαιτίας αυτού έχουν τη δυνατότητα να παράγονται μαζικά με κόστος συγκρίσιμο με αυτό των σημερινών συμβατικών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας. Σήμερα, οι κυψέλες καυσίμου είναι ακριβές κυρίως λόγω των υλικών κατασκευής τους όπως είναι τα πολυμερή στις μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων και των ευγενών μετάλλων που χρησιμοποιούνται ως καταλύτες και παράγονται σε μικρές ποσότητες.

δ) Οι κυψέλες καυσίμου δεν παράγουν θόρυβο, πράγμα που τις κάνει ιδιαίτερα ελκυστικές σε στρατιωτικές εφαρμογές και σε εφεδρικά συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

ε) Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, το οποίο δεν συναντάται ελεύθερο στη φύση, αλλά μπορεί να παραχθεί από εγχώριες πρώτες ύλες. Η παραγωγή μπορεί να γίνει είτε μέσω ηλεκτρόλυσης είτε μέσω αναμόρφωσης υδρογονανθράκων.

## **4.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ**

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Κυψελών Καυσίμου (Fuel Cells) μπορούν να συνοψιστούν ως κάτωθι:

- Είναι ικανά να παράγουν ενέργεια όπως οι μηχανές καύσεως με ελάχιστη ή χωρίς μόλυνση στο περιβάλλον από τις εκπομπές αερίων ρύπων (π.χ. CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>).
- Το παραγόμενο υποπροϊόν του νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει άλλες ανάγκες, όπως το πόσιμο νερό για το πλήρωμα ενός πλοίου.
- Η δυνατότητα των Fuel Cells να παραγάγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της ηλεκτροχημικής διαδικασίας, αυξάνει σημαντικά τις αποδόσεις των

συστημάτων σε σύγκριση με την απόδοση των μηχανών καύσεως, όπως ήδη έχει αναφερθεί.

- Η παραγωγή του υδρογόνου, ως καύσιμο, μπορεί να επιτευχθεί από όλες τις χώρες, που σημαίνει ότι η αγορά ενέργειας θα επιφέρει την ενεργειακή ανεξαρτησία στις χώρες που δεν έχουν δικές τους ενεργειακές παραγωγές.
- Τα συστήματα fuel cells δεν έχουν κανένα κινούμενο μέρος, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη σιωπηλή λειτουργία, καμία ενεργειακή απώλεια λόγω τριβών, ενώ απαιτούν ελάχιστη συντήρηση.
- Μερικοί από τους τύπους fuel cells, όπως ο PEM και ο DMFC, είναι κατάλληλοι για τα στρατιωτικά συστήματα, λόγω της χαμηλής λειτουργικής θερμοκρασίας τους και της σιωπηλής λειτουργίας τους (π.χ. υποβρύχια).
- Οι Κυψέλες Καυσίμου έχουν ένα πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών, ισχύος από μερικά Watt έως και αρκετά MWatt.

Αντίθετα, τα κύρια μειονεκτήματα των Κυψελών Καυσίμου (Fuel Cells) μπορούν να συνοψιστούν ως κάτωθι:

- Η αποθήκευση του αερίου υδρογόνου το οποίο χρησιμοποιούν ως καύσιμο. Το αέριο υδρογόνου έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα έναντι άλλων καυσίμων και έτσι απαιτεί πολύ μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης. Επιπλέον, η αποθήκευση του αερίου υδρογόνου έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως δεξαμενές υψηλής πίεσης που καθιστούν την αποθήκευση ιδιαίτερα δύσκολη.
- Οι υπάρχουσες υποδομές ανεφοδιασμού καυσίμων (π.χ. στους λιμένες) είναι κατασκευασμένες για τη διανομή και διαχείριση των συμβατικών καυσίμων (π.χ. πετρελαίου), συνεπώς δεν καλύπτουν τις τεχνικές απαιτήσεις και τις απαιτήσεις ασφάλειας για τη διανομή-διαχείριση μη συμβατικών καυσίμων όπως π.χ. του υδρογόνου.

- Η παραγωγή των καυσίμων υδρογόνου σε μεγάλες ποσότητες είναι ακόμα δύσκολη και δαπανηρή. Μερικές από τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου παράγουν οξειδία του άνθρακα που αποτελούν αέρια ρύπανσης του περιβάλλοντος.
- Η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων από τα συστήματα fuel cells, όπως η αιθανόλη, το οινόπνευμα και η μεθανόλη, απαιτούν την εγκατάσταση ενός επεξεργαστή καυσίμων στο σύστημα, γεγονός που αυξάνει το κόστος.
- Εξαιτίας των προβλημάτων αποθήκευσης του υδρογόνου, το σύστημα δεν είναι ικανό να επιτύχει τη μακροχρόνια διάρκεια χωρίς τακτικό ανεφοδιασμό σε καύσιμα, πράγμα το οποίο δε συμβαίνει με τους κινητήρες diesel.
- Το κόστος του συστήματος είναι αρκετά υψηλό, ως αποτέλεσμα της ακριβής διαδικασίας παραγωγής και της χρήσης ακριβών υλικών, όπως ο λευκόχρυσος, του οποίου η (χρηματιστηριακή) διακύμανση της τιμής επηρεάζει σημαντικά την τιμή των fuel cells.
- Ο χρόνος ζωής ενός συστήματος στοιβας fuel cells είναι χαμηλότερος έναντι των μηχανών καύσεως. Αυτό το γεγονός αυξάνει τη λειτουργική δαπάνη του συστήματος κατά τη διάρκεια του χρόνου ζωής του.

## 4.6 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

### 4.6.1 Πρόγραμμα «NEMO H<sub>2</sub>» / PEM

Στις αρχές του 2006, οι εταιρείες **Alewijnse Marine Systems**, **Lovers**, **Linde Gas**, **Marine Service North** και **Integral**, συνεργάστηκαν, με στόχο την ανάπτυξη, κατασκευή και εκμετάλλευση ενός σκάφους υδρογόνου, το «**Nemo H<sub>2</sub>**» (Εικόνα 39) . Το σκάφος υδρογόνου προοριζόταν για τη μεταφορά επιβατών στο κέντρο της πόλης του Άμστερνταμ.



Εικόνα 39: Nemo H2 (Πηγή: <http://www.shipspotting.com>).

Το σύστημα Κυψέλης Καυσίμου για το εν λόγω επιβατηγό σκάφος, σχεδιάστηκε για τη μεταφορά 100 ατόμων. Η Κυψέλη Καυσίμου ήταν τύπου **PEM** 65 kW με καύσιμο υδρογόνο, σε συνδυασμό με σύστημα μπαταριών **30 έως 50 kW** και αποθήκευση υδρογόνου **40 kg** σε **8 κυλίνδρους στα 350 bar**.

Η εγκατάσταση του συστήματος Κυψελών Καυσίμου, των μπαταριών και του συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου, έγιναν με απόλυτη επιτυχία, ενώ προσαρμόστηκαν πολύ εύκολα στο πλοίο. Η αξιολόγηση κινδύνου και οι δοκιμές, έδειξαν ότι είναι δυνατή η ασφαλής λειτουργία του σκάφους.

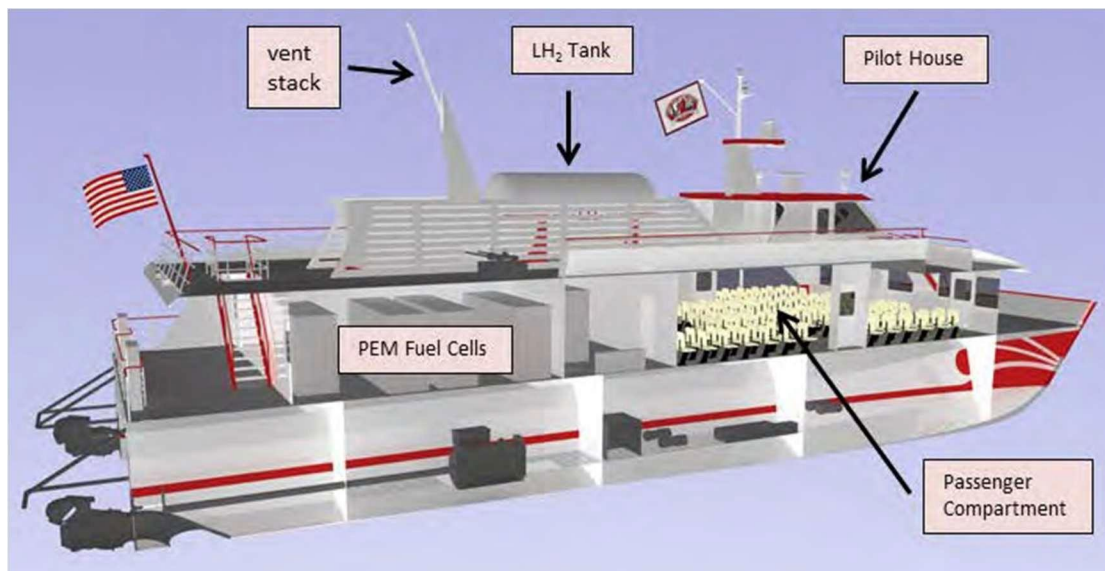
Το NEMO H<sub>2</sub> λειτουργεί από το **2012 έως σήμερα**.



#### 4.6.2 Πρόγραμμα «SF-BREEZE» / PEM

Το **SF-BREEZE** αποτελεί πρόγραμμα συνεργασίας μεταξύ της **Sandia National Laboratories**, του **Αμερικανικού Γραφείου Ναυτιλίας**, της **Αμερικανικής Ακτοφυλακής** και της ναυπηγικής εταιρίας **Elliott Bay Design Group**.

Το πρόγραμμα ξεκίνησε το **2015** και **συνεχίζεται έως και σήμερα**. Στόχος του είναι να εκπονηθεί μελέτη σκοπιμότητας για την εξέταση των τεχνικών, ρυθμιστικών και οικονομικών πτυχών της κατασκευής και λειτουργίας: 1) **εφοδιαστικού σταθμού υδρογόνου** και 2) **επιβατηγού πλοίου (Εικόνα 40)**, το οποίο θα χρησιμοποιεί Κυψέλες τύπου **PEM** και, ως καύσιμο, υγρό υδρογόνο, για τη μεταφορά 150 επιβατών στην περιοχή του κόλπου του Σαν Φρανσίσκο.



Εικόνα 40: Sf-breeze (Πηγή: <https://www.greencarcongress.com>).

Η ιδέα ήταν η κατασκευή ενός ferry από αλουμίνιο, με δύο ηλεκτροκινητήρες των **2,5 MW** που τροφοδοτούνταν από 41 μονάδες Κυψελών Καυσίμου, ισχύος 120 kW η καθεμία.

Οι Κυψέλες Καυσίμου και το σύστημα αποθήκευσης καυσίμου (LH<sub>2</sub>) είναι πάνω από το κατάστρωμα για λόγους ασφάλειας και κανονιστικής συμμόρφωσης. Ο χώρος που καταλαμβάνουν είναι σημαντικός και, κανονικά, θα χρησιμοποιείτο για τους επιβάτες. Το καύσιμο είναι **υγρό υδρογόνο**, ενώ το πρόγραμμα περιλαμβάνει και την κατασκευή και λειτουργία σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου στο λιμάνι.

### 4.6.3 Πρόγραμμα «PA-X-ELL» / HT-PEM

Το Pa-X-ell αποτελεί μέρος του Γερμανικού προγράμματος "e4ships" του Εθνικού Προγράμματος Καινοτομίας (National Innovation Program – NIP) για την Τεχνολογία Υδρογόνου και Κυψελών Καυσίμου. Ο στόχος είναι να μειωθούν οι εκπομπές αέριων ρύπων σε κρουαζιερόπλοια, γιουτ και ferries, μέσω της χρήσης ανεξάρτητου δικτύου παροχής ενέργειας στα σκάφη, με βάση τις Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells). Μια άλλη πτυχή του προγράμματος είναι η επαλήθευση της αποτελεσματικότητας των μέτρων ασφαλείας που αφορούν στη χρήση Κυψελών Καυσίμου επί των επιβατηγών πλοίων, καθώς και η αναμενόμενη οικονομία.

Για την επιτυχή υλοποίηση του ζητούμενου ανεξάρτητου και ασφαλούς συστήματος, η κατασκευή βασίστηκε σε Κυψέλες Καυσίμου τύπου **HT- PEM** (PEM υψηλής θερμοκρασίας) (Εικόνα 41).



Εικόνα 41: Ανάπτυξη κυψέλης καυσίμου τύπου PEM στην DLR (Πηγή: <https://www.e4ships.de/english/maritime-shipping/pa-x-ell-2/>)

Οι κύριοι εταίροι του προγράμματος είναι οι εταιρείες: **MEYER WERFT, Fr. Lurssen Werft, Flensburger Schiffbau-Gesellschaft, DNV GL, DLR και SerEnergy**. Το πρόγραμμα ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2009 και ολοκλήρωσε την πρώτη φάση τον Δεκέμβριο του 2016. Η δεύτερη φάση του προγράμματος θα υλοποιηθεί κατά το χρονικό διάστημα 2017 – 2022.

Η μονάδα καυσίμου HT-PEM αναπτύχθηκε και σχεδιάστηκε από τις εταιρείες SerEnergy και Fischer eco και παρέχει ισχύ 5 kW. Οκτώ από αυτές τις Κυψέλες Καυσίμου συναρμολογούνται σε μία στοίβα των 30 kW. Το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται εσωτερικά με επεξεργασία του καυσίμου μεθανόλης. Η μεθανόλη είναι ιδιαίτερα κατάλληλη, δεδομένου ότι, σε συνθήκες

περιβάλλοντος, είναι σε υγρή κατάσταση, μετατρέπεται εύκολα σε H<sub>2</sub> και είναι εύκολα διαθέσιμη. Ωστόσο, δεδομένου ότι η μεθανόλη είναι τοξική, στη δεύτερη φάση του προγράμματος (2017 – 2022) θα διερευνηθεί η χρήση φυσικού αερίου (NG). Επιπλέον, διερευνήθηκε η χρήση θερμικής ενέργειας για περαιτέρω χρήση για θέρμανση και ψύξη με τη χρήση μονάδας ψύξης απορρόφησης ACU.

## **Αρχές Ασφάλειας και Ρυθμιστικό Πλαίσιο**

Ο κύριος κίνδυνος για την ασφάλεια των συστημάτων fuel cells επί των ποντοπόρων πλοίων, είναι η χρήση εξαιρετικά εύφλεκτων καυσίμων, όπως **μεθανόλη** ή **υδρογόνο**. Για την ασφαλή λειτουργία και την επιτυχή αντιμετώπιση των ιδιαίτερων κινδύνων, απαιτείται σειρά μέτρων όπως: επαρκής εξαερισμός, συστήματα συναγερού, πυροπροστασία και ιδιαίτερα μέτρα περιορισμού της πιθανότητας και των συνεπειών της διαρροής αερίου. Για τις εγκαταστάσεις Κυψελών Καυσίμου, ιδίως για τα επιβατηγά πλοία, το ρυθμιστικό καθεστώς αποτελείται επί του παρόντος από τρεις κύριες ομάδες κανόνων και κανονισμών: 1) τη Διεθνή Σύμβαση για την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα (**SOLAS** – Safety Of Life At Sea), συμπεριλαμβανομένων των απαιτήσεων “Ασφαλούς Επιστροφής σε λιμάνια” (**SRtP** – Safe Return to Port) της προαναφερθείσας Σύμβασης

Ορισμένες βασικές αρχές ασφάλειας και η πρακτική εφαρμογή τους παρουσιάζονται παρακάτω.

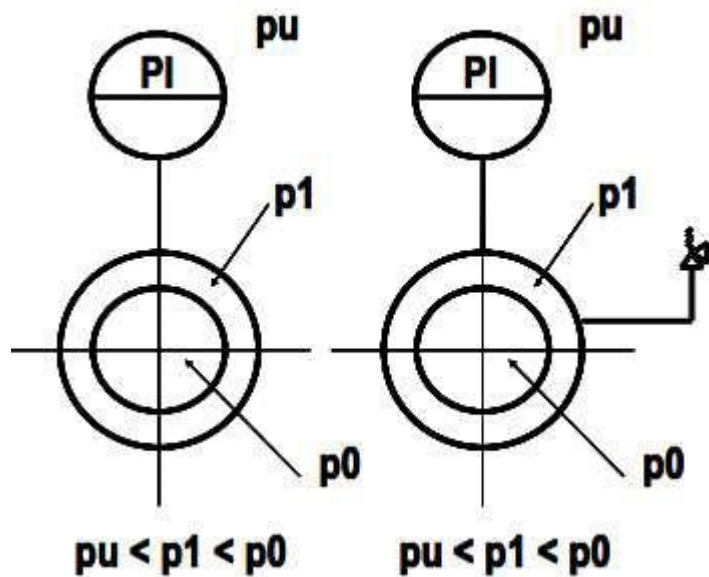
## **Κριτήριο μεμονωμένης αστοχίας**

Το κριτήριο μεμονωμένης αστοχίας εφαρμόζεται γενικά. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα κυψελών καυσίμου πρέπει να είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε καμία βλάβη να μπορεί να οδηγήσει σε οποιαδήποτε επικίνδυνη κατάσταση. Επιπλέον, όλα τα εξαρτήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια πρέπει να πιστοποιούνται για το σκοπό τους.

## **Αρχή δύο φραγμών για την προμήθεια φυσικού αερίου**

Η αρχή των δύο φραγμών για την παροχή αερίου σημαίνει ότι κάθε αέριο περιβάλλεται από δύο ανεξάρτητα εμπόδια. Εάν ένα φράγμα αποτύχει, το δεύτερο φράγμα θα εξασφαλίσει την ασφαλή συγκράτηση του αερίου. Είναι δυνατόν να ληφθούν μέτρα για την εκπλήρωση της αρχής των δύο φραγμών. Η αρχή μπορεί να επιτευχθεί είτε με σωληνώσεις διπλού τοιχώματος (**Εικόνα 42**), με σωλήνα αερίου εντός του αγωγού εξαερισμού ή με τη χρήση κλειστών γκαζιού (π.χ. στεγανός χώρος αποθήκευσης H<sub>2</sub>).

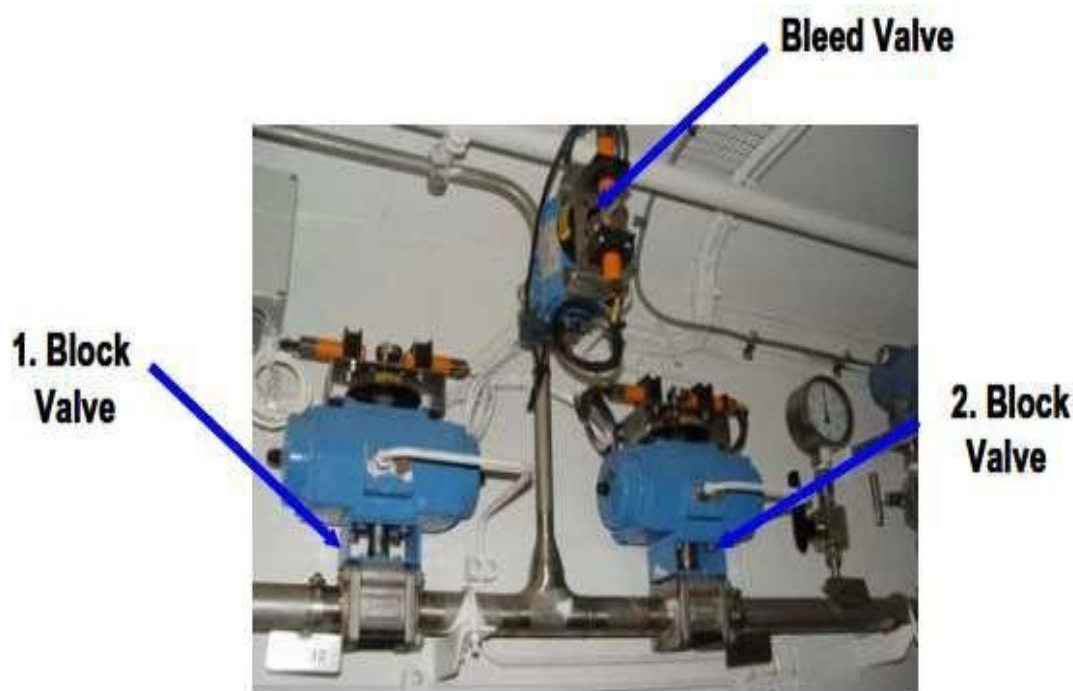
Η αστοχία ενός φράγματος του σωλήνα διπλού τοιχώματος μπορεί να παρακολουθείται από έναν αισθητήρα πίεσης μεταξύ των σωλήνων. Επομένως, το επίπεδο πίεσης μεταξύ των σωλήνων πρέπει να είναι χαμηλότερο από την πίεση του εσωτερικού σωλήνα και υψηλότερο από την πίεση περιβάλλοντος. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να ανιχνευθεί αστοχία του εσωτερικού και εξωτερικού φράγματος. Μια βλάβη του σωλήνα αερίου στον αγωγό εξαερισμού θα ανιχνεύεται τυπικά σε έναν αισθητήρα αερίου στο τέλος του καναλιού εξαερισμού.



Εικόνα 42: Σχηματική απεικόνιση σωληνώσεων διπλού τοιχώματος.

### Διαχωρισμός συστημάτων

Σε γενικές γραμμές, οι ασφαλείς περιοχές πρέπει να είναι στεγανές με αέριο χωρισμένες από περιοχές όπου μπορεί να προκύψει επικίνδυνη ατμόσφαιρα. Ακολουθώντας την αρχή των δύο φραγμών, ο διαχωρισμός των συστημάτων αερίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια διαμόρφωση βαλβίδας διπλής ροής (**Εικόνα 43**), ο διαχωρισμός των χώρων από τα φορτία πυρκαγιάς από μόνωση πυρασφάλειας (π.χ. μόνωση A-60) και για τη ροή αέρα εξαερισμού με ξεχωριστό ανεξάρτητο σύστημα εξαερισμού για τον αντίστοιχο χώρο (αποθήκη αερίου, περίβλημα κυψελών καυσίμου, κ.λπ.). Η αποθήκη αερίου και ο χώρος εγκατάστασης κυψελών καυσίμου πρέπει να διαχωριστεί από ασφαλείς χώρους, μηχανοστάσια κ.λπ.



Εικόνα 43: Διαμόρφωση βαλβίδας διπλής ροής.

Έχει αποδειχθεί από την πρακτική εμπειρία ότι οι ονομαστικές αρχές μπορούν είτε να εφαρμοστούν για μεγάλα συστήματα, αλλά και σε μικρά συστήματα με λίγα μόνο kW.

### **Ασφαλής εξαερισμός αερίων**

Για να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία ενός συστήματος κυψελών καυσίμου, έχουν εγκατασταθεί πολλά συστήματα εξαερισμού. Αυτά περιλαμβάνουν τον εξαερισμό εύφλεκτων αερίων από τις βαλβίδες ασφαλείας. Εάν το πεπιεσμένο αέριο χρησιμοποιείται ως καύσιμο όπως συμβαίνει με το FCS ALSTERWASSER (ZEMSHIP Project) όπου χρησιμοποιήθηκε υδρογόνο 340 bar, μπορούν να χρησιμοποιηθούν βύσματα τήξης για την αποσυμπίεση των φιαλών σε περίπτωση πυρκαγιάς. Ο αερισμός κανονικής λειτουργίας περιλαμβάνει τον εξαερισμό δωματίων με αέρια που περιέχουν εξαρτήματα και καυσαέρια από την κυψέλη καυσίμου που μπορεί επίσης να περιέχουν εύφλεκτα αέρια. Οι γραμμές εξαερισμού πρέπει να εγκατασταθούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην προκύψουν κίνδυνοι από αυτά τα συστήματα εξαερισμού. Επομένως, τα ανοίγματα της γραμμής εξαερισμού πρέπει να εγκατασταθούν μακριά από πηγές ανάφλεξης, να έχουν επαρκή απόσταση από ασφαλείς περιοχές και να διασφαλίζουν ότι δεν μπορούν να εισέλθουν επικίνδυνα αέρια και ατμοί σε ασφαλείς περιοχές. Για γραμμές εξαερισμού υψηλής πίεσης από βύσματα τήξης και βαλβίδες ασφαλείας, πρέπει επιπλέον να διασφαλίζεται ότι τα ανοίγματα εξαερισμού εγκαθίστανται κάθετα προς τα πάνω για να αποφευχθεί ένα είδος φαινομένου "flame thrower" σε περίπτωση πυρκαγιάς.

## **Προστασία από εκρήξεις**

Για να αποφευχθεί ο κίνδυνος έκρηξης, όλες οι περιοχές όπου μπορεί να προκύψει εύφλεκτο αέριο πρέπει να είναι κατάλληλες για το σκοπό αυτό. Επομένως, πρέπει να γίνει ταξινόμηση περιοχής - γενικά σύμφωνα με το DIN EN 60079-10 - για τον καθορισμό των επικίνδυνων περιοχών και των απαραίτητων μέτρων προστασίας από εκρήξεις. Η έννοια της κλασικής προστασίας από εκρήξεις αποτελείται από τρία βήματα:

- Πρόληψη εκρηκτικής ατμόσφαιρας (π.χ. εξαερισμός, αρχή δύο φραγμών, αποτροπή συσσώρευσης αερίου, μόνιμα σφικτά συστήματα [π.χ. συγκολλημένοι σωλήνες])
- Πρόληψη πηγών ανάφλεξης (π.χ. χρήση μόνο πιστοποιημένου εξοπλισμού, θερμοκρασία κάτω από 80% θερμοκρασία αυτοανάφλεξης, αποφυγή της ηλεκτροστατικής ηλεκτρική ενέργειας)
- Μείωση των επιπτώσεων έκρηξης (π.χ. διαχωρισμός θέσεων, αρχή δύο φραγμών, ενεργητικά και παθητικά μέτρα πυροπροστασίας, χρήση μη εύφλεκτων υλικών)

## **Προστασία σκαφών αποθήκευσης υψηλής πίεσης**

Από τις πιο κρίσιμες βλάβες που μπορεί να συμβεί είναι η ρήξη ενός δοχείου αποθήκευσης πίεσης λόγω υπερπίεσης, πυρκαγιάς κ.λπ. Η ρήξη ενός δοχείου πίεσης πρέπει να αποφεύγεται σε κάθε περίπτωση. Επομένως, το δοχείο πίεσης πρέπει να προστατεύεται από ενεργά συστήματα όπως συνδυασμένο σύστημα πυρανίχνευσης και πυρόσβεσης και παθητικά συστήματα όπως βύσματα τήξης και βαλβίδες ασφαλείας. Επίσης πρέπει να εγκατασταθούν «πραγματικές» βαλβίδες ασφαλείας, όχι μόνο βαλβίδες υπερπίεσης, οι οποίες δεν έχουν πιστοποιημένους ρυθμούς εκροής. Γενικά πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα συστήματα σωληνώσεων, που είναι σχεδιασμένα για χαμηλότερη πίεση, πρέπει να προστατεύονται από την υπερπίεση.

## **Προστασία απο εξωτερικούς παράγοντες**

Για να αποφευχθεί η διαταραχή του συστήματος κυψελών καυσίμου επί του σκάφους, το σύστημα κυψελών καυσίμου πρέπει να σχεδιαστεί σύμφωνα με τις τυπικές περιβαλλοντικές συνθήκες επί των πλοίων. Επιπλέον, το σύστημα κυψελών καυσίμου πρέπει να προστατεύεται από εξωτερικές επιδράσεις όπως συγκρούσεις, μηχανικές βλάβες και πυρκαγιά. Ειδικά στην περίπτωση πυρκαγιάς που είναι η πιο κρίσιμη αποτυχία.

Για την αποφυγή προβλημάτων που προκαλούνται από εξωτερικές επιδράσεις χρησιμοποιούνται συνήθως τα ακόλουθα μέτρα. Για να αποφευχθούν τυχόν ζημιές από συγκρούσεις, πρέπει να επιλεγεί ανάλογα η θέση της εγκατάστασης καυσίμου (π.χ. επαρκής απόσταση από την επένδυση κελύφους). Οι μηχανικές ζημιές μπορούν να αποφευχθούν από κατάλληλα προστατευτικά κεφαλής (π.χ. πλάκες προστασίας πάνω από σωλήνες αερίου). Ο κίνδυνος πυρκαγιάς μπορεί να ελαχιστοποιηθεί χρησιμοποιώντας κατάλληλα παθητικά και ενεργά μέτρα πυροπροστασίας τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στη ναυτιλία (π.χ. μόνωση πυροπροστασίας, αυτόματο σύστημα πυρόσβεσης).

## **Παρακολούθηση ασφάλειας**

Γενικά, όλα τα εξαρτήματα της αλυσίδας ασφαλείας πρέπει να πιστοποιούνται για το σκοπό τους. Για κρίσιμα συστήματα απαιτείται πιστοποίηση SIL (Safety Integrity Level) ή ισοδύναμη. Τα πιο σημαντικά συστήματα παρακολούθησης που σχετίζονται με την ασφάλεια είναι το σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιάς και αερίου στο χώρο αποθήκευσης αερίου και στο χώρο εγκατάστασης κυψελών καυσίμου. Γενικά, το όριο συναγερμού και τερματισμού λειτουργίας του συστήματος ανίχνευσης αερίου είναι 20% και 40%. Αυτό πρέπει να εξεταστεί λεπτομερώς συμπεριλαμβάνοντας τη θέση των αισθητήρων και τον χρόνο αντίδρασης. Εάν ο αερισμός περιλαμβάνεται στο σύστημα ασφαλείας ή στην έννοια της προστασίας από έκρηξη, απαιτείται παρακολούθηση ροής αέρα. Σε περίπτωση αποτυχίας αερισμού απαιτείται διακοπή λειτουργίας του συστήματος για την αποφυγή απροσδιόριστων επικίνδυνων καταστάσεων. Επιπλέον, ενδέχεται να απαιτούνται περαιτέρω συστήματα παρακολούθησης σύμφωνα με τη συγκεκριμένη διάταξη του συστήματος (π.χ. διακόπτες στάθμης σε διαχωριστές νερού στη γραμμή καθαρισμού, κ.λπ.).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το καθαρό περιβάλλον του πλανήτη μας αποτελεί δημόσιο αγαθό και προκειμένου να ζήσουμε σε έναν καθαρό πλανήτη η ναυτιλία από την πλευρά της θα πρέπει να κάνει το δικό της χρέος και να μειώσει τη ρύπανση του περιβάλλοντος που οφείλεται στα πλοία ξεκινώντας με τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Θα πρέπει επίσης να ανακαλύψει νέους τρόπους για την παροχή ενέργειας στα πλοία τα οποία θα πρέπει να σχεδιάζονται με γνώμονα τις ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις. Είναι όμως γεγονός πως τα οικολογικά πλοία εκτός από τη χρήση τους για σκοπούς περιβαλλοντικής προστασίας θα αποτελέσουν και μια καινούρια σελίδα στη βιομηχανία της ναυτιλίας μιας και τα πλεονεκτήματά τους επεκτείνονται και στα οικονομικά μεγέθη και την εξοικονόμηση χρημάτων.

Όλοι όσοι ασχολούνται με το θαλάσσιο εμπόριο και τις μεταφορές έχουν επηρεαστεί από την οικονομική ύφεση, τις υψηλές τιμές των καυσίμων και την αναγκαιότητα εφαρμογής μιας σειράς κανόνων σε σχέση με τις εκπομπές αερίων. Είναι κατανοητό πια, πως τα πλοία πρέπει να γίνουν περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον και να είναι περισσότερο ανταγωνιστικά ως προς το κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Πληθώρα ναυπηγείων έχουν παρουσιάσει ναυπηγικά σχέδια ή έχουν ήδη ναυπηγήσει πειραματικά πλοία. Γενικότερα υπάρχουν προτάσεις έτσι ώστε τα πλοία να χρησιμοποιούν ως μέσο πρόωσης, νέες τεχνολογίες κινητήρες και καύσιμα, πολύ πιο φιλικά προς το περιβάλλον ή να χρησιμοποιούν ολικά ή μερικά τεχνολογίες ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Όλες οι νέες προτάσεις κινούνται στην αναγκαιότητα να είναι οικολογικά, αλλά και πιο οικονομικά.

Καθώς το θαλάσσιο εμπόριο συνεχίζει να έχει ανοδικές τάσεις, η έρευνα στην αποδοτική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον κλάδο – παρά το γεγονός ότι βρίσκεται σε σχετικά πρώιμο στάδιο – αυξάνεται πολύ γρήγορα. Από το 2007 έως το 2012, ο παγκόσμιος ναυτιλιακός στόλος κατανάλωσε 250-325 εκατομμύρια τόνους καυσίμων ετησίως, ποσότητα που μεταφράζεται στο 2.8% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ετησίως (3.1% των εκπομπών CO<sub>2</sub>), μέσα σε μια αγορά ορυκτών καυσίμων όπου οι τιμές των καυσίμων των πλοίων διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά και κάτω από τον χρονικό ορίζοντα για σημαντική μείωση της εκπομπής ρύπων από τον κλάδο.



Το παράρτημα VI της MARPOL που συμπλήρωσε την σύμβαση το 1997 και άρχισε να ισχύει από τον Μάιο του 2005, εξειδικεύει τις εκπομπές καυσαερίων στην ατμόσφαιρα και αναφέρει τα οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), τα αιωρούμενα σωματίδια, καθώς τις πτητικές οργανικές ενώσεις. Η συγκεκριμένη διεθνής σύμβαση προβλέπει επίσης, περιοχές ελέγχου χαμηλών εκπομπών θείου (S) στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Οι κανονισμοί της MARPOL θέτουν ως υποχρεωτικό τον δείκτη αποδοτικού ενεργειακού σχεδιασμού EEDI (Energy Efficiency Design Index) για νέα πλοία και το σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) για όλα τα πλοία. Οι τεθέντες αυτοί οικονομικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί, αποτελούν βασικούς παράγοντες για την υιοθέτηση από την ναυτιλιακή οικογένεια της χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων και πηγών ενέργειας.

Η πλειονότητα των ναυτιλιακών εταιρειών υποστηρίζει ότι τα κίνητρα για την τοποθέτηση στα πλοία τους φιλικών προς το περιβάλλον εφαρμογών είναι κυρίως οικονομικά και αφορούν:

- την μεγαλύτερη οικονομία ενέργειας,
- τις διεθνείς και εθνικές φοροαπαλλαγές σε διάφορα λιμάνια, την συμμόρφωση με τις εθνικές και διεθνείς απαιτήσεις,
- την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος,
- τη βελτίωση της τεχνογνωσίας στη θαλάσσια μεταφορά επιβατών και φορτίων και
- τη παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών θαλάσσιας μεταφοράς.

Ενώ, στον αντίποδα, διαμηνύουν ότι τα σημαντικότερα εμπόδια σχετικά με την υιοθέτηση των νέων τεχνολογιών για την ναυπήγηση καθαρών, «πράσινων» πλοίων είναι:

- το αρχικό κόστος ναυπήγησης,
- το ετήσιο λειτουργικό κόστος συντήρησης,
- η έλλειψη υποδομών υποδοχής πλοίου και η ύπαρξη υποστηρικτικών επιχειρήσεων των λιμένων,
- η παγκόσμια οικονομική κρίση ,γεγονός που δυσκολεύει γενικότερα τις επενδύσεις.

Φυσικά, το να κάνει η ναυτιλία το άλμα και να μπει στο επόμενο μεγάλο κεφάλαιο της ιστορίας της συνεπάγεται επένδυση σε οικολογικά πλοία, την αύξηση των επενδύσεων για επιπλέον ανάπτυξη τόσο σε εθνικό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, την έρευνα και ανάπτυξη της τεχνολογίας προς την κατεύθυνση κατασκευής πιο ενεργειακά αποδοτικών πλοίων. Αυτός λοιπόν είναι ένας προβληματισμός που υπάρχει: πέρα από τα πλεονεκτήματα που αναμφισβήτητα προκύπτουν από τη χρήση οικολογικών πλοίων τα πράσινα πλοία είναι σε πειραματικό στάδιο και η απόδοση τους θα κριθεί στη θάλασσα. Το βασικότερο ερώτημα όμως είναι αν και κατά πόσο είναι δυνατόν να υπάρξει ομαλή μετάβαση χωρίς υψηλό κόστος από το επίπεδο της έρευνας στην αγορά.

Η παγκόσμια οικονομική κρίση του 2008 μείωσε τα επόμενα χρόνια κατά 50% τις κατασκευές πλοίων, αλλά παράλληλα έδειξε πόσο μεγάλη είναι η ανάγκη της αγοράς να στραφεί σε οικονομικότερα πλοία που παράλληλα καλύπτουν το διεθνές αίτημα για φιλικότερα προς το περιβάλλον πλοία. Δεν είναι τυχαίο πως η Ευρωπαϊκή Ένωση πρόσφατα προσέφερε 200 εκατομμύρια ευρώ για την έρευνα πάνω στο συγκεκριμένο τομέα, με στόχο την κατάργηση του άνθρακα και την εξάλειψη του CO<sub>2</sub>. Ωστόσο με όλο και περισσότερες χώρες και ναυπηγεία να προσανατολίζονται προς την κατασκευή οικολογικών πλοίων είναι φανερό πως η νέα τάση είναι υπαρκτή και όχι μόνο σε θεωρητικό επίπεδο αλλά στην πράξη. Σίγουρα ο μετασχηματισμός της ναυτιλίας σε “οικολογική” θα αποτελέσει μια χρονοβόρα και οικονομικά δαπανηρή διαδικασία.

Η μετάβαση αυτή προϋποθέτει τη μετατόπιση από τη χρήση ορυκτών καυσίμων στις μεταφορές, προς τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών σχεδιαστικών λύσεων και τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αν και μέχρι σήμερα η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη «ενεργειακή σύνθεση» της ναυτιλίας είναι περιορισμένη οι κατασκευαστές συνεχίζουν όλο και περισσότερο βελτιώνουν τον σχεδιασμό των πλοίων ενώ οι πιλοτικές εφαρμογές φέρνουν ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Βέβαια δεν πρέπει να αγνοούνται και τα εμπόδια που επιδρούν ανασταλτικά στην αύξηση της διείσδυσης των λύσεων που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην ναυτιλία. Τόσο η έλλειψη εμπορικής βιωσιμότητας τέτοιων συστημάτων όσο και η ύπαρξη διαφορετικών κινήτρων μεταξύ των ιδιοκτητών και των διαχειριστών των πλοίων έχουν αποτέλεσμα στην καθυστέρηση της ανάπτυξης καθαρών ενεργειακά λύσεων στον τομέα.

Ο προσεκτικός σχεδιασμός της μετάβασης από τα ορυκτά καύσιμα σε καθαρές ενεργειακά λύσης αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη των οικολογικών πλοίων. Ακόμη σημαντικό στοιχείο αποτελεί και η δημιουργία και υλοποίηση υποστηρικτικών πολιτικών και η παροχή κινήτρων για την προώθηση της έρευνας, της καινοτομίας με στόχο την εμπορική βιωσιμότητα για τις λύσεις ανανεώσιμης ενέργειας στη ναυτιλία. Σημαντικό ρόλο παίζει και θα συνεχίσει και στο μέλλον να παίζει ο ρόλο και η δράση του IMO οποίος με τους κανονισμούς του θα καθορίσει το σχεδιασμό των μελλοντικών πλοίων και τη βελτίωση και μέγιστη δυνατή

εκμετάλλευση των νέων τεχνολογιών ώστε εκείνες να είναι σύμμαχος στη προσπάθεια μείωσης ρύπανσης του περιβάλλοντος. Η μετάβαση της ναυτιλίας στην «πράσινη» εποχή της μπορεί να είναι ακόμα στο πρώιμο στάδιο της και να κάνει τώρα τα πρώτα της βήματα από το θεωρητικό επίπεδο σε εκείνο της παγκόσμιας αγοράς ωστόσο με την τεχνολογία να εξελίσσεται με γεωμετρική πρόοδο δεν θα αργήσει να έρθει η στιγμή που ναυτιλία θα έχει αρκετά διαφορετικό πρόσωπο. Θα έχει λοιπόν ενδιαφέρον αν η παγκόσμια αγορά, που πάντα λειτουργεί ανταγωνιστικά και με το φόβο πως όποιος δεν επενδύσει νωρίς στις τεχνολογίες του αύριο ίσως μείνει πίσω στη μελλοντική οικονομική πραγματικότητα, θα αντιδράσει με τρόπο που αυτή μετάβαση θα γίνει στα αμέσως επόμενα χρόνια. Οι προϋποθέσεις για μια βιώσιμη ναυτιλία με χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, έχουν ήδη χαραχθεί.

## 5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Αναφορικά με τη χρήση και την υιοθέτηση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου και της χρήσης υδρογόνου ή LNG στη ναυτιλία μπορούμε να οδηγηθούμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η υιοθέτηση της τεχνολογίας Κυψελών Καυσίμου για το μηχανολογικό εξοπλισμό πρόωσης των σκαφών, είναι, επί του παρόντος, οικονομικά ασύμφορη. Ωστόσο, στα πλαίσια των νέων κανονισμών για την προστασία του περιβάλλοντος, η εν λόγω τεχνολογία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μικρότερα σκάφη, τα οποία θα εκτελούν σχετικά μικρές διαδρομές.
- Το κόστος παραγωγής του υδρογόνου, παρά τις ισχυρές ενδείξεις για ταχεία μείωση της τιμής παραγωγής του, θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και να σταθεροποιηθεί σε κάτω από 2,50 €/kg σε σημερινές τιμές, ώστε να αποκτήσει ανταγωνιστική τιμή και να είναι εφικτή η ευρείας κλίμακας χρήσης του από τη ναυτιλία.
- Το κόστος παραγωγής των Κυψελών Καυσίμου (PEMFC/SOFC) που θα χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία, θα πρέπει να μειωθεί δραστικά, φθάνοντας στα επίπεδα κάτω των 50 €/kW σε σημερινές τιμές, ώστε να γίνει ανταγωνιστική η χρήση τους. Το επίπεδο αυτό δεν φαίνεται αδύνατο σε βάθος εικοσαετίας και με μεγάλες ποσότητες παραγωγής.
- Το κόστος αποθήκευσης του καυσίμου H<sub>2</sub> θα πρέπει να μειωθεί σημαντικά, δεδομένου ότι επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό τόσο την επένδυση σε μηχανολογικό εξοπλισμό Κυψέλης Καυσίμου όσο και την χωρητικότητα (AXE – Απώλεια Χωρητικότητας Εκτοπίσματος) στα μεγάλα πλοία (π.χ. μεταφοράς φορτίου και tanker).
- Επί του παρόντος, η υιοθέτηση της τεχνολογίας Κυψελών Καυσίμου δύναται να αφορά μόνο σκάφη με σχετικά μικρές ενεργειακές απαιτήσεις (της τάξης έως 500 kW) ή τις ενεργειακές απαιτήσεις των βοηθητικών μηχανών (auxiliary) μεγαλύτερων πλοίων.

- Αποτελεί αδήριτη ανάγκη η ταχεία υιοθέτηση τεχνολογιών πράσινης ενέργειας από τη ναυτιλία, για όσο το δυνατόν περισσότερους τύπους σκαφών, στα πλαίσια των ολοένα βελτιούμενων τεχνολογικών δυνατοτήτων μαζικής κατασκευής συστημάτων Κυψελών Καυσίμου μεγάλης απόδοσης και ισχύος.
- Οι λιμένες θα πρέπει να προετοιμαστούν το ταχύτερο δυνατό για τη μελλοντική χρήση και τον εφοδιασμό «πράσινων» καυσίμων της ναυτιλίας, φροντίζοντας για την υλοποίηση των κατάλληλων υποδομών.
- Τομείς για περαιτέρω και βαθύτερη έρευνα στο εν λόγω αντικείμενο, θα μπορούσε να είναι: το κόστος για τη υλοποίηση των απαραίτητων υποδομών των λιμένων για την τροφοδοσία των πλοίων με υδρογόνο, το κόστος για τα πρόσθετα μέτρα ασφάλειας που θα απαιτηθούν στους λιμένες και τα πλοία, η δυνατότητα ανταγωνιστικής παραγωγής και ασφαλούς χρήσης “επί πλοίων συστημάτων Κυψελών Καυσίμου της τάξης αρκετών MWatt, το κόστος ασφαλούς αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου “επί πλοίου” κλπ.

## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABB: *Optimized cost of ownership*. See all the hidden costs without paying any. (2013)
- Argyros, D; Smith, T; Raucci, C; Sabio, N: *Global marine fuel trends 2030*. 2014
- Carlo Raucci: *The potential of hydrogen to fuel international shipping*. Ph.D. Thesis, UCL Energy Institute. (February 1, 2017).
- Cohen, L.; Tate, A.; Weinhold, N.: *Investigation into the implications of fuel cell shipboard integration into the T-AGOS 19 class*. In: Naval Surface Warfare Center Carderock Division Center for Innovation in Ship Design (NSWCCD CISD) (2011)
- Docter, A; Lamm, A: *Gasoline fuel cell systems*. In: Journal of Power Sources 84 (1999), Nr. 2, S.194-200
- Han, Jingang; Charpentier, JF; Tang, Tianhao: *State of the art of fuel cells for ship applications*. In: Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on IEEE (Veranst.), (2012), S. 1456-1461

IEA: *Technology roadmap. Hydrogen and Fuel Cells*. International Energy Agency, (2015)  
James, Brian D.; Moton, Jennie M.; Colella, Whitney G.: *Hydrogen Storage Cost Analysis*

John J. Minnehan and Joseph W. Pratt: *Practical Application Limits of Fuel Cells and Batteries for Zero Emission Vessels* (SANDIA REPORT / SAND2017-12665 / Printed November 2017)

Ludvigsen, KB; Ovrum, E: *Fuel cells for ships*. In: Research and Innovation. Position Paper (2012)

Saito, Naohiro: *The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies*" (2018). World Maritime University Dissertations. 618.

Shilpa, S., Anurag, V. (2015): *Introduction to Fuel Cell Technology: A Review*. IARJSET, NCREE-2015 Vol.2, Special Issue 1.

Smith, T.W.P.; O'Keeffe, E.; Haji, S.; Agnolucci, P.: *Maritime Sector Model Report*. (2013)

SØdal, Sigbjørn: *Fuel cells in shipping. Higher capital costs and reduced flexibility*. (2003)

STUDY ON THE USE OF FUEL CELLS IN SHIPPING (EMSA - European Maritime Safety Agency) - Tomas Tronstad, Hanne Hogmoen Astrand, Gerd Petra Haugom, Lars Langfeldt (DNV·GL report) (2017)

T. Maiyalagan, Sivakumar Pasupathi: *Components for PEM Fuel cells: An Overview*. MATERIALS SCIENCE FORUM, vol. 657: 143-189 (2010)

Trozzi C. (2010). Update of Emission Estimate Methodology for Maritime Navigation ,  
Techne Consulting report ETC.EF.10 DD, May 2010

Trygve Riis and Gary Sandrock / Oystein Ulleberg and Preben J.S. Vie: *Hydrogen Storage – Gaps and Priorities*. (2006)

European Commission (EC). (2017). Study on the Implementation of Article 7(3) of the "Directive on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure"– Fuel Price Comparison.

Frano Barbir: "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", Elsevier Academic Press, (2005). Ken Knany, Keith Frasher: "Fuel Cell Electronics Packaging", Springer, (2007). Supsamaiam Srinivasm: "Fuel Cells from Fundamentals to Applications", Springer, (2006).

Mehrdod Ehsani, Yimintsao, Sebastien E.Gay, Ali Fimadi: "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamental Theory and Design", CRC PRESS, (2005).

James Larminie, Andrew Dicks,: "Fuel Cell Systems Explained", Wiley, (2003).

Ryan O' Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B.Prinz: "Fuel Cell Fundamentals", Wiley, (2006).

Frederick 's, Borclay: "Fuel Cells Engines and Hydrogen, an energy approach", Wiley, (2006).

Bazari , Z. & Longva, T., (2011). *Air Pollution And Energy Efficiency: Estimated CO<sub>2</sub> emissions reduction from introduction of mandatory technical and operational energy efficiency measures for ships*, London: Marine Environment Protection Committee.

Becker, A., Inoue., S., Schwegler, B. & Fischer, M., (2011). *Climate Change Impacts and Adaptation: A Challenge for Global Ports*, Geneva, Switzerland: Springer Science+Business Media B.V.

Duncan , J., (2003). *Costs Of Biodiesel Production*, London: Duncan. European Environment Agency, 2018. *Air quality in Europe*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

IMO, (1982). *Code Of Safety For Nuclear Merchant Ships: Resolution A.491(XII)*, London: International Maritime Organization .

Kalligeros, S., Landalv, I. & Maniatis, K., (2017). *Building Up the Future*, Brussels: European Commission.

Mishra, G. S. & Yeh, . S., (2011). *Inclusion of marine bunker fuels in a national LCFS scheme. A draft report prepared for the National Low Carbon Fuel Standard Project*,

Davis: Institute of Transportation Studies, University of California.

Olmer, N., Comer, B., Mao, X. & Rut, D., (2017). *Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015*, Washington DC: International Council on Clean Transportation.

Sundet, J. . K., Dalsoren, . S. B., Isaksen, I. S. & Berglen, T. F., (2003). Emission From International Sea Transportation and Environmental Impact. *Journal Of Geophysical Research*.

Ueda, N., (2012). *Practical Use of LNG Fuelled Ships and ClassNK Activities (Technical Essays)*.. Tokyo: ClassNK magazine.

UK P&I Club, (2018). Biofuels: Marine Transport, Handling and Storage Issues. Στο: *Carefully to Carry*. s.l.:UK P&I Club, pp. 215-222.

Vermeire, M. . B., (2012). *Everything You Need to Know About Marine Fuels*. Ghent, Belgium: Chevron Global Marine Products.

Xing H, Stuart C, Spence S, Chen H, (2021) Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050, *Journal of Cleaner Production* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>.

## **ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Ευρωπαϊκή Ένωση, (2009). *Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/28/EC*, Βρυξέλλες: Ε.Ε..

Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνεδριο ΕΕΣ, (2018). *Ατμοσφαιρική ρύπανση: Η προστασία της υγείας μας παραμένει ανεπαρκής*, Λουξεμβούργο: Ευρωπαϊκή Ένωση.

Καλλίγερος, Σ., Αντωνάκος, Π., Μελανιτης, Ν. & Ζαννίκου, Υ., (2010). Ναυτιλιακά Καύσιμα Προδιαγραφές Προοπτικές. *Ναυσίβιος Χώρα*, pp. 244-251.

Κλιάνης, Λ. Χ., Νικολού, Ι. Κ. & Σιδέρης, Ι. Α., (2017). *Μηχανές Εσωτερικής Καύσεως*. Β επιμ. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.

Κοτρίκλα, Α.-Μ., (2015). *Ναυτιλία και Περιβάλλον*. Αθήνα: Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα .



Παπαευαγγέλου, Τ. Ι., (1995). *Καύσιμα-Λιπαντικά*. Γ επιμ. Αθήνα: Ιδρυμα Ευγενίδου.  
Παρδάλη , . Α. Ι., (2007). *Οικονομική και Πολιτική των Λιμένων*. Αθήνα: Σταμούλης.  
Στούρνας, Σ., Λόης, Ε., Ζαννίκος, Φ. & Καρώνης, Δ., (1993). *Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών*. Αθήνα: s.n.

Αυγουστίδη Βάλια, (Ιούνιος 2010), «Κλιματική αλλαγή, αρχίζοντας από τα βασικά»,  
Περιοδικό "Maritech News"

Βλάχος Γ.,( 2007), «Διεθνής Ναυτιλιακή Πολιτική» Β έκδοση, Αθήνα. Εκδ. Σταμούλης

Γκιζιάκης Κ., Παπαδόπουλος Α., Πλωμαρίτου Ε. (Αθήνα 2006) "Ναυλώσεις" Εκδόσεις  
Σταμούλη, Β' έκδοση σελ, 918-920.

Γκιζιάκης Κ., Παπαδόπουλος Α., Πλωμαρίτου Ε. (2006) "Ναυλώσεις" Εκδόσεις  
Σταμούλη, Β' έκδοση,σελ. 918-920

Κολλιριάτης Ιωαν. (2006 - Α' έκδοση 1982) «Ναυπηγία», Πειραιάς, Εκδ. Ναυτικών και  
Τεχνικών βιβλίων

Παρδάλη Ι. Αγγελική, (2007) «Οικονομική και Πολιτική των Λιμένων» Αθήνα, Εκδόσεις  
Σταμούλης

Περιοδικό "Maritech News" (Ιούνιος 2010), «Αέρια Ρύπανση και Ναυτιλία», σελ. 76 Περιοδικό  
Maritech News (Ιούνιος 2010) "Fouling vs Anti-fouling" (MER 1996b)

Τσελέντης Β. (2009) «Απαγόρευση χρήσης TBT Υφαλοχρωμάτων – Επιπτώσεις στη  
Ναυτιλία»

Τσελέντης Β. (2008), «Διαχείριση θαλάσσιου περιβάλλοντος και ναυτιλία», Πειραιάς,  
Εκδ. Σταμούλης

Σακελλαριάδου Φ.(2013),«Ρύπανση και Ναυτιλία»