

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

-ΤΟ ΚΑΥΣΙΜΟ ΥΦΑ/LNG ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ :ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ

Πτυχιακή Εργασία

Εισηγητής

Κωνσταντίνος Χριστόπουλος

Επιβλέπων καθηγητής

Τζιράκης Ευάγγελος

Ηράκλειο, 2024

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ABSTRACT

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1. *ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ LNG ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΝΑΥΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*

1.1 Ιστορικό-εισαγωγή

1.2 Προέλευση, σύσταση, χαρακτηριστικά

1.3 Διείσδυση στη ναυτιλία - τάσεις ναυπήγησης

1.4 Διαθεσιμότητα- Χρήση του ΥΦΑ στην παγκόσμια αγορά

1.5 Χρήση ΥΦΑ στα ελληνικά νησιά και στις θαλάσσιες μεταφορές εσωτερικού

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΦΑ ΩΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Εισαγωγή

2.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ΥΦΑ επί του πλοίου

2.2.1 Τύποι Δεξαμενών

2.2.2 Δεξαμενές τύπου «Α»

2.2.3 Δεξαμενές τύπου «Β»

2.2.4 Δεξαμενές τύπου «C»

2.3 Τύποι κινητήρων και προωστήριων συστημάτων

2.3.1 Ατμοστροβιλικές μονάδες παραγωγής ενέργειας

2.3.2 Ηλεκτρική πρόωση με μεσόστροφες μηχανές ντίζελ διπλού καυσίμου

2.3.3 Αργόστροφοι κινητήρες διπλού καυσίμου

2.3.3.1. Κινητήρες υψηλής πίεσης αερίου- MAN Diesel & Turbo

2.3.3.2. Κινητήρες χαμηλής πίεσης αερίου-WINGD

2.3.3.3 Σύγκριση των δύο τεχνολογικών επιλογών

3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ/ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΦΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ- ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΤΗΝ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ

3.1 Εισαγωγή

3.2 Στάδια παραγωγικής διαδικασίας ΥΦΑ

3.3 Πλεονεκτήματα της χρήσης του ΥΦΑ ως καύσιμο

3.3.1 Περιβαλλοντική επίδραση

3.3.2 Οικονομική επίδραση

3.3.3 Εφαρμογή της τεχνολογίας στην πράξη

3.4 Μειονεκτήματα της χρήσης του ΥΦΑ ως καύσιμο

3.5 Συμπεράσματα

4. ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΥΦΑ – ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΩΤΥΠΩΜΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

4.1 Εισαγωγή

4.2 Κανονιστικό πλαίσιο-Περιβαλλοντική απόδοση

4.3 Μεθοδολογία προσδιορισμού διαφυγόντος μεθανίου

4.3.1 WtT, Εκπομπές από το ΥΦΑ και τα συμβατικά καύσιμα πλοίων κατά την παραγωγική κι εφοδιαστική διαδικασία.

4.3.2 TtW, Εκπομπές «επί του πλοίου» από το ΥΦΑ και τα συμβατικά καύσιμα πλοίων κατά την καύση και παραγωγή ισχύος πρόωσης

4.3.3 Συγκριτικά αποτελέσματα

4.4 Αξιολόγηση της χρήσης του ΥΦΑ σε σχέση με άλλα ναυτιλιακά καύσιμα

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη της χρήσης καθαρότερων μορφών ενέργειας με σκοπό τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με την εισαγωγή των δεξαμενόπλοιων υγροποιημένου φυσικού αερίου (ΥΦΑ/LNG) και των πρώτων πλοίων με καύσιμο ΥΦΑ, οδήγησε σε σημαντική αύξηση της ζήτησης του ΥΦΑ για βιομηχανική, εμπορική και οικιακή χρήση, μια και το ΥΦΑ θεωρείται ως το καθαρότερο και πιο αποδοτικό ορυκτό καύσιμο. Επιπλέον, το τραγικό δυστύχημα στον πυρηνικό σταθμό της FUKUSHIMA συνέτεινε στην αλματώδη αύξηση της ζήτησης του ΥΦΑ τόσο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των βιομηχανικών χωρών της Άπω Ανατολής όσο και για τις ανάγκες θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο.

Η μεγάλη αύξηση της ζήτησης σε συνδυασμό με τις εντεινόμενες περιβαλλοντικές απαιτήσεις, αποτέλεσαν το μοχλό ανάπτυξης των τεχνολογιών που σχετίζονται με το ΦΑ , τόσο σε σχέση με τα προωστήρια συστήματα των αεροφόρων πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, όσο και των τεχνολογιών που φροντίζουν για τη διαχείριση και αποθήκευση του ΦΑ, με σκοπό την ασφαλέστερη και αποδοτικότερη χρήση και διαχείρισή του.

Αναφορικά με τα συστήματα αποθήκευσης αναπτύχθηκαν τόσο αυτοφερόμενοι τύποι δεξαμενών, οι οποίες αναφορικά με ναυτικές εφαρμογές, κατασκευάζονται εκτός του πλοίου, όπως όλα σχεδόν τα μηχανήματα κι εξοπλισμός ενός πλοίου και στη συνέχεια μεταφέρονται κι εγκαθίστανται εντός του πλοίου σε προδιαγεγραμμένη θέση. Επιπλέον αναπτύχθηκαν και δεξαμενές τύπου μεμβράνης όπως λέγονται, οι οποίες κατασκευάζονται επί του πλοίου και χρησιμοποιούν το κύτος ως το «εξωτερικό» περίβλημα αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό στο έπακρο την ωφέλιμη χωρητικότητα. Τα συστήματα διαχείρισης του ΥΦΑ φροντίζουν είτε να μεταφέρουν με ασφάλεια το ΦΑ από και προς το πλοίο καθώς και στους διάφορους καταναλωτές, είτε να το μετατρέπουν από την υγρή στην αέρια φάση και το αντίστροφο.

Η αποδοτικότερη χρήση του ΥΦΑ σε ναυτικές εφαρμογές οδήγησε στην εξέλιξη τόσο των εφαρμοζόμενων προωστήριων συστημάτων όσο και των κινητήρων που τα απαρτίζουν. Ενώ αρχικά οι ατμοστρόβιλοι ήταν η βασική μονάδα παραγωγής τόσο προωστήριας όσο και ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοίο που χρησιμοποιεί ΥΦΑ ως καύσιμο, στη συνέχεια επικράτησαν οι 4-χρονοι κινητήρες εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου, χαμηλής πίεσης αερίου, σε διάταξη ηλεκτροπρόωσης (οι ΜΕΚ παράγουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία μέσω ηλεκτροκινητήρων κινεί την έλικα-ες του πλοίου, καλύπτοντας ταυτόχρονα και τις υπόλοιπες ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου) ενώ σήμερα έχουν επικρατήσει οι 2-Χρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου, υψηλής ή χαμηλής πίεσης αερίου, σε διάταξη μηχανικής πρόωσης (απευθείας σύζευξη μηχανής με έλικα). Στη μηχανική διάταξη πρόωσης χρησιμοποιούνται επιπλέον 4-Χρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του πλοίου.

Οι κινητήρες διπλού καυσίμου ,χαμηλής πίεσης, μπορούν να λειτουργήσουν είτε με αέριο που εξαερώνεται στις δεξαμενές φορτίου (BOG) , ντίζελ, ή μαζούτ (MDO, HFO) . Οι κινητήρες «διπλού» καυσίμου έχουν διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας ανάλογα με το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί. Όταν καίγεται αέριο ως καύσιμο (λειτουργία αερίου), ο κινητήρας υιοθετεί την αρχή του «φτωχού» κύκλου Otto (lean burn). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται μία πηγή θερμότητας για την έναυση του αερίου μίγματος η οποία για τους συγκεκριμένους κινητήρες είναι η έγχυση μικρής ποσότητας πιλοτικού καυσίμου Diesel. Αντιθέτως, εάν χρησιμοποιούνται υγρά καύσιμα MDO ή HFO, ο κινητήρας λειτουργεί σε κύκλο ντίζελ (λειτουργία ντίζελ), όπως ένας συμβατικός κινητήρας υγρού καυσίμου

Οι κινητήρες διπλού καυσίμου , υψηλής πίεσης , λειτουργούν πάντα σε κύκλο Diesel, και για το λόγο αυτό έχουν υψηλότερη απόδοση, γεγονός που τους έχει καταστήσει ως την

επικρατέστερη επιλογή. Επιπλέον οι κινητήρες υψηλής πίεσης παρουσιάζουν πολύ χαμηλές διαφυγές ΦΑ (methane slip) κατά τη διαδικασία της καύσης, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα φιλικούς προς το περιβάλλον.

Οι διαφυγές ΦΑ (methane slip) αποτελούν ένα μέγεθος το οποίο αποτελεί σημείο ζωτικού ενδιαφέροντος για την αξιολόγηση του ΦΑ ως καύσιμο, ενώ λαμβάνονται υπόψιν στους υπολογισμούς αερίων ρύπων του θερμοκηπίου για τους οποίους έχουν τεθεί σε ισχύ κανονιστικές διατάξεις, με συγκεκριμένες συνέπειες για τους χρήστες.

Προς χάριν αντικειμενικότερης αξιολόγησης του ΥΦΑ ως καύσιμο, αλλά και των υπολοίπων καυσίμων, υπολογίζονται οι εκπομπές ρύπων από το σημείο εξόρυξης μέχρι τη χρήση/καύση του. Τα 2 επιμέρους στάδια της αξιολόγησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενός καυσίμου τα οποία συνιστούν τη συνολική εικόνα (η οποία καλείται ως ***«Well-To-Weak»)*** των εκπεμπόμενων ρύπων είναι :

- Το πρώτο από το σημείο παραγωγής ή εξόρυξης μέχρι την παράδοσή του στο πλοίο, ***(WELL TO TANK)***
- Το δεύτερο από τη δεξαμενή του πλοίου μέχρι τη μετατροπή του σε κινητική ενέργεια περιστροφής της έλικας για την κίνηση του πλοίου, ***(TANK-TO-WEAK)***

Η χρήση του ΥΦΑ ως καύσιμο σε ναυτικές εφαρμογές αποτελεί πεδίο αντιπαράθεσης μια και υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι προσέγγισης οι οποίοι οδηγούν σε διαφορετικά συμπεράσματα τόσο ως προς τα τεχο-οικονομικά αποτελέσματα όσο και προς τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Το ΥΦΑ θεωρείται ως καύσιμο μετάβασης στην εποχή των μελλοντικών καυσίμων τα οποία δεν θα περιέχουν άνθρακα.

Σημαντικότατο ρόλο στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας θα διαδραματίσει και η ψηφιοποίηση (ανάλυση, αξιολόγηση και χρήση δεδομένων) της λειτουργίας όλων των επιμέρους σταδίων. Αναφορικά με τη λειτουργία και τη χρήση του πλοίου και του μηχανολογικού του εξοπλισμού, η χρήση αναλύσεων δεδομένων για την εξοικονόμηση όσο το δυνατόν περισσότερου καυσίμου και εκπομπών κατά τη διάρκεια της μακράς διέλευσης ενός πλοίου είναι πρωταρχικής σημασίας.

Η χρήση ιστορικών δεδομένων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ταχύτητας διέλευσης σε συνδυασμό με διάφορα μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης του εξοπλισμού και του βυθίσματος του πλοίου, των ρυθμίσεων αυτόματου πιλότου, της διακοπής του περιττού βοηθητικού εξοπλισμού και της μείωσης του αριθμού/ισχύος των κινητήρων επαρκώς στις συνθήκες της θάλασσας, θα βοηθήσουν σημαντικά την προσπάθεια απανθρακοποίησης της ναυτιλίας

Η «αλλαγή» τρόπου σκέψης, εκπαίδευσης και υιοθέτησης περιβαλλοντικής ευαισθησίας από το πλήρωμα και όλο το στελεχιακό δυναμικό της Ναυτιλίας θα είναι επίσης βασική προϋπόθεση για τη βέλτιστη αξιοποίηση όλων των τεχνολογικών εξελίξεων και εφαρμογών, για την επίτευξη του στόχου της απανθρακοποίησης της Ναυτιλίας.

Τέλος υπηρεσίες που σχετίζονται με τη Ναυτιλιακή βιομηχανία , όπως λιμενικές υποδομές ηλεκτροδότησης (μέσω ενέργειας από Α.Π.Ε.) των πλοίων κατά το διάστημα ελλιμενισμού, μείωση του χρόνου αναμονής για τον ελλιμενισμό, κλπ. θα συμβάλλουν σημαντικά στην απανθρακοποίηση της Ναυτιλίας.

ABSTRACT

The ever-increasing need to use cleaner forms of energy to reduce greenhouse gases combined with the introduction of liquefied natural gas (LNG) tankers and the first LNG fueled ships has led to a significant increase in the demand for LNG for industrial , commercial and domestic use, since LNG is considered the cleanest and most efficient fossil fuel. In addition, the tragic accident at the Fukushima nuclear power plant contributed to the rapid increase in demand for LNG, both to meet the energy needs of the industrialized countries of the Far East and for heating needs during the winter season.

The great increase in demand, combined with the intensifying environmental requirements, have been the driving force for the development of technologies related to LNG, both in relation to the propulsion systems of LNG carriers, as well as the technologies that take care of the management and storage of the LNG, with the aim of its safer and more efficient use and management

In relation to storage systems, self-supporting types of tanks were developed, which, in relation to naval applications, are manufactured outside the ship, like almost all the machinery and equipment of a ship, and then transported and installed inside the ship in a specified position. In addition, so-called membrane-type tanks were developed, which are built on board the ship and use the hull as the "outer" casing, thus maximizing the useful capacity. The LNG management systems take care of either safely transporting the LNG from and to the ship as well as to the various consumers, or converting it from the liquid to the gas phase and vice versa.

The need for efficient use of LNG in marine applications has led to the development of both the applied propulsion systems and the engines that make them up. While initially steam turbines were the main driver of production of both propulsion and electrical energy in an LNG-fueled ship, later the 4-stroke dual-fuel engines , of low gas pressure, on diesel-electric applications subsequently prevailed (Internal Combustion Engines generate electricity which by means of electric motors drives the propeller-s of the ship, covering at the same time the rest of the electrical needs of the ship) while today the 2-Stroke dual-fuel engines, with high or low gas pressure, in a mechanical propulsion arrangement (direct coupling of engine with propeller) have prevailed. Additional 4-Stroke dual-fuel engines are used in the mechanical propulsion system, to cover the ship's electrical needs.

Dual-fuel, low-pressure engines can run on either Boil-off gas (BOG), diesel, or heavy fuel oil (MDO, HFO). "Dual" fuel engines have different modes of operation depending on the fuel in use. When burning gas (gas mode), the engine adopts the principle of the "lean" Otto cycle (lean burn). In this case, a heat source is required to ignite the gas mixture, which for the specific engines is the injection of a small amount of Diesel which is called pilot fuel.

Conversely, if MDO or HFO liquid fuels are used, the engine operates in a diesel cycle (diesel mode) like a conventional liquid fuel engine.

Dual fuel, high pressure engines always operate on a Diesel cycle, and for that reason have a higher efficiency, which has made them the preferred choice. In addition, high-pressure engines show very low methane slip during the combustion process, which makes them particularly environmentally friendly.

Methane slip is a factor that is a point of vital interest for the assessment of LNG as fuel, while it is taken into account in the calculations of greenhouse gas emmissions for which regulatory provisions have come into force, with specific consequences for users.

For the sake of a more objective assessment of LNG as a marine fuel, as well as other fuels, the emissions from the extraction point to its use/combustion are calculated. The 2 individual stages of the assessment of the environmental footprint of a fuel which constitute the overall picture (which is called "Well-To-Weak") of the emitted pollutants are:

- The first from the point of production or extraction until its delivery to the ship, (WELL TO TANK)
- The second from the tank of the ship until its conversion into kinetic energy of rotation of the propeller for the movement of the ship, (TANK-TO-WEAK)

The use of LNG as a fuel in marine applications is a field of controversy since there are different approaches that lead to different conclusions both in terms of techno-economic results and environmental effects. LNG is considered as a transition fuel to the era of future fuels that will not contain carbon.

The digitization (analysis, evaluation and use of data) of the operation of all individual stages of ship's operation, will play a very important role in the decarbonisation of shipping. In relation to the operation and use of the ship and its mechanical equipment, the use of data analytics to save as much fuel and emissions as possible during a ship's long transit is paramount.

The use of historical data to determine the optimal transit speed combined with various measures to reduce fuel consumption, including optimizing the ship's equipment and draft, autopilot settings, disconnecting unnecessary auxiliary equipment and reducing the number /power of the engines sufficiently in sea conditions, will significantly help the effort to decarbonize shipping

The "change" of mindset, training and adoption of environmental sensitivity by the crew and the entire management force of the Marine industry will also be a basic condition for the optimal utilization of all technological developments and applications, to achieve the goal of decarbonization of Shipping.

Finally, services related to the Shipping industry, such as port infrastructures for electrification (through renewable energy) of ships during docking, reduction of waiting time for docking, etc. will contribute significantly to the decarbonization of Shipping.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το πρώτο υγραεριοφόρο πλοίο "Methane Pioneer"
Εικόνα 2: Παγκόσμιος στόλος πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ
Εικόνα 3: Προδιαγραφές/σύσταση του φυσικού αερίου
Εικόνα 4 :Εξέλιξη της παγκόσμιας δυναμικότητας παραλαβής ΥΦΑ
Εικόνα 5: Τρέχουσα αποτύπωση αριθμού πλοίων ανεφοδιασμού ΥΦΑ

Εικόνα 6**:** Κατανομή ΥΦΑ με βάση το πεδίο χρήσης

Εικόνα 7: Δυναμικότητα υγροποίησης ΦΑ, ανά κύρια εξαγωγό χώρα.

Εικόνα 8: Παγκόσμιος «χάρτης» ανάπτυξης χρήσης ΥΦΑ

Εικόνα 9: «Ισοζύγιο» εισαγωγών -εξαγωγών ΥΦΑ κατά το 2021

Εικόνα 10: Πλωτός τερματικός σταθμός αποτελούμενος από πλοίο

αποθήκευσης και υγροποίησης ΥΦΑ

Εικόνα 11: Σταθμός Ρεβυθούσας, υποδοχής δεξαμενοπλοίων ΥΦΑ, παραλαβής, αποθήκευσης και αεριοποίησης ΥΦΑ για την τροφοδοσία με Φυσικό Αέριο του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς ΦΑ

Εικόνα 12: Γενική διάταξη δεξαμενών τύπου «Α»

Εικόνα 13: Εγκάρσια τομή πλοίου με δεξαμενή τύπου «Α»

Εικόνα 14: Δεξαμενή τύπου Α κατά τη μεταφορά της για

εγκατάσταση επί του πλοίου

Εικόνα 15: Ενσωμάτωση δεξαμενής Τύπου Α στο κύτος του πλοίου

Εικόνα 16α:: Σφαιρική δεξαμενή Kvaerner-Moss

Εικόνα 16β: Αεριοφόρο πλοίο με 5 δεξαμενές τύπου «Β»

Εικόνα 17: Διαστολή και συστολή σφαιρικών δεξαμενών.

Εικόνα 18: : Δεξαμενή τύπου C

Εικόνα 19:: Οριζόντιες σφαιρικές δεξαμενές σε πλοίο ΥΦΑ.

Εικόνα 20:: Δεξαμενή τύπου μεμβράνης

Εικόνα 21: Ανατομία δεξαμενής τύπου μεμβράνης

Εικόνα 22: Εσωτερικό δεξαμενής τύπου μεμβράνης

Εικόνα 23: Πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ με δεξαμενές τύπου μεμβράνης

Εικόνα 24: Διάγραμμα εκμετάλλευσης του ΥΦΑ το οποίο αεριοποιείται και σχήματα παραγωγής ισχύος (πρόωσης και ηλεκτροπαραγωγής) σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ

Εικόνα 25: Σχηματική τυπική διάταξη ατμοστροβιλικής εγκατάστασης

Εικόνα 26α: Διάταξη ζεύγους των ατμοστροβίλων σε

μηχανοστάσιο πλοίου μεταφοράς ΥΦΑ.

Εικόνα 26β: Σύστημα ηλεκτροπρόωσης με 5 κινητήρες διπλού καυσίμου, μειωτήρα στροφών και μονή έλικα

Εικόνα 27: Αρχές λειτουργίας μηχανής διπλού καυσίμου.

Εικόνα 28: Βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα 50DF της κατασκευάστριας WARTSILA

Εικόνα 29: Τομές κινητήρα τύπος 50DF της κατασκευάστριας WARTSILA

Εικόνα 30: Άνω μέρος κινητήρα 50DF της κατασκευάστριας WARTSILA

Εικόνα 31: Διάγραμμα λειτουργίας κινητήρα διπλού καυσίμου, «φτωχού» μίγματος

Εικόνα 32: Κινητήρας αερίου υψηλής πίεσης ME-GI

Εικόνα 33: Εμβολοφόρος συμπιεστής αερίου υψηλής πίεσης κατασκευαστή BURCKHARDT

Εικόνα 34: Διάταξης πρόωσης με κινητήρες ME-GI.

Εικόνα 35: Κινητήρες WINGD, XDF

Εικόνα 36: Τύποι συμπιεστών αερίου χαμηλής πίεσης, διαφόρων κατασκευαστών

Εικόνα 37: Διάταξης πρόωσης με κινητήρες WinGD X-DF

Εικόνα 38: Συγκριτικός πίνακας κινητήρων WinGD X-DF, με κινητήρες ME-GI

Εικόνα 39: Εγκατάσταση συστήματος πλύσης καυσαερίων «κλειστού» τύπου

Εικόνα 40: Επιμέρους στάδια «υπολογισμού» εκπεμπόμενων ρύπων

από την παραγωγή έως την χρήση ενός καυσίμου

Εικόνα 41: Παραγωγική διαδικασία «Well-To-Weak» για 3 διαφορετικούς τύπους καυσίμων

Εικόνα 42: Παγκόσμια κατανάλωση ναυτιλιακών καυσίμων και επίδραση της «εισαγωγής» νέων καυσίμων στις εκπομπές CO2

Εικόνα 43: Εκπομπές αερίων ρύπων σε μηχανές «διπλού καυσίμου»

με χρήση υγρών και αέριων καυσίμων

Εικόνα 44: Επίδραση του κόστους καυσίμου ανά τύπο πλοίου

Εικόνα45: Εξέλιξη των τιμών των καυσίμων, που έχουν ως βάση τον άνθρακα

Εικόνα 46: Προβλεπόμενο Κόστος καυσίμου σε U$D/MWh παραγόμενης ισχύος

Εικόνα 47: Πρόταση φορολόγησης ΕΕ ανά τύπο καυσίμου

Εικόνα 48: Μεγαλύτεροι «χώρες» εξαγωγείς ΥΦΑ

Εικόνα 49: Ανεφοδιασμός πλοίου μέσω βυτιοφόρου

Εικόνα 50: Ανεφοδιασμός πλοίου μέσω υγραεριοφόρου

μικρής κλίμακας

Εικόνα 51: Αριθμός πλοίων που χρησιμοποιούν ΥΦΑ ως καύσιμο

Εικόνα 52: Συνολική εικόνα εκπομπών CO2 των διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων

Εικόνα 53: Ποιοτικά χαρακτηριστικά ναυτιλιακών καυσίμων

Εικόνα 54: Λειτουργικά χαρακτηριστικά ναυτιλιακών καυσίμων

Εικόνα 55: Συνολικός αριθμός πλοίων που χρησιμοποιούν ΥΦΑ ως καύσιμο ΕΚΤΟΣ των μεταφορέων ΥΦΑ.

Εικόνα 56: Συνολικός αριθμός πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ

Εικόνα 57 : Μηχανές ΥΦΑ, πλοία που χρησιμοποιούνται και δεδομένα διαφυγόντος μεθανίου

Εικόνα 58: WtT, εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία παραγωγής διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων σε gr/MJ (grams/megajoule)

Εικόνα 59: TtW, εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία της καύσης διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων σε gr/MJ (grams/megajoule)

Εικόνα 60: Ειδική κατανάλωση ανά τύπο καυσίμου για τις εξεταζόμενες μηχανές

Εικόνα 61: Εκπομπές κύκλου ζωής ανά τύπο μηχανής και καύσιμο για ορίζοντα 100 ετών

Εικόνα 62: Εκπομπές κύκλου ζωής ανά τύπο μηχανής και καύσιμο για ορίζοντα 20 ετών

1. ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ LNG ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΕ ΝΑΥΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΟ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καθολικότητα της χρήσης πετρελαίου στη ναυτιλία «παραβιάστηκε» για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1980 με την εισαγωγή των δεξαμενόπλοιων υγροποιημένου φυσικού αερίου (ΥΦΑ/LNG) και των πρώτων πλοίων με καύσιμο ΥΦΑ, η οποία προήλθε από τη σημαντική αύξηση της ζήτησης του ΥΦΑ για βιομηχανική, εμπορική και οικιακή χρήση, ως ένα καθαρότερο και πιο αποδοτικό ορυκτό καύσιμο. Επιπλέον, η έναρξη ισχύος του παγκόσμιου ανώτατου ορίου θείου του IMO, μπορεί να σήμανε το τέλος της εποχής της χρήσης ενός «καθολικού» καυσίμου (δηλαδή ενός κοινού τύπου καυσίμου από όλα τα πλοία).

Τα πρώτα υγραεριοφόρα πλοία, τα οποία ναυπηγήθηκαν στη δεκαετία του 1960, καλούμενα τότε «μεθανιοφόρα», έφεραν ορθογώνιες τραπεζοειδείς δεξαμενές που στη συνέχεια αυτές εξελίχθηκαν σε σφαιροειδείς, των οποίων τα άνω τμήματα εξέχουν του κυρίου καταστρώματος του πλοίου. Τα σύγχρονα υγραεριοφόρα φέρουν δεξαμενές τύπου μεμβράνης και σφαιρικού τύπου. Το πρώτο υγραεριοφόρο πλοίο, με το όνομα "Methane Pioneer", βλέπε εικόνα 1, έφυγε από τον ποταμό Calcasieu στις ακτές του κόλπου της Λουϊζιάνα στις 25 Ιανουαρίου 1959. Μεταφέροντας το πρώτο φορτίο ΥΦΑ/LNG στον ωκεανό, ταξίδεψε στο Ηνωμένο Βασίλειο όπου και παραδόθηκε το φορτίο.



Εικόνα 1*: Το πρώτο υγραεριοφόρο πλοίο "Methane Pioneer"*

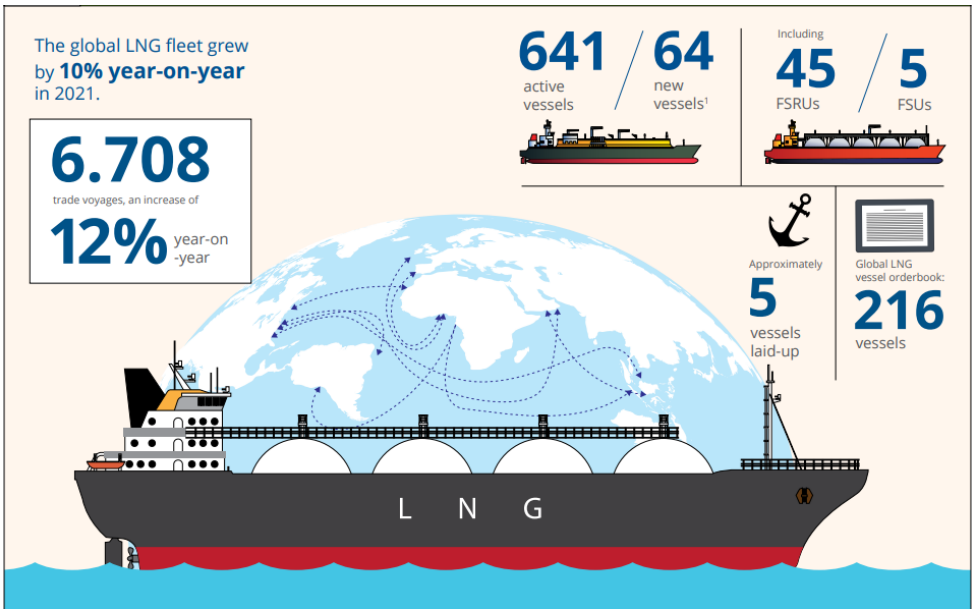
Η επακόλουθη αύξηση της αγοράς αυτής, επέφερε μεγάλη επέκταση του στόλου μέχρι σήμερα, όπου γιγαντιαία υγραεριοφόρα πλοία που μεταφέρουν μέχρι και 266.000 m^3 ταξιδεύουν παγκοσμίως. Η επιτυχία του ειδικώς τροποποιημένου πλοίου Normarti, τύπου C1-M-AV1, που μετονομάστηκε σε "Methane Pioneer", οδήγησε το Συμβούλιο Αερίου και τη Conch International Methane Ltd. να παραγγείλουν δύο νεότευκτα υγραεριοφόρα : το "Methane Princess" και το "Methane Progress". Τα πλοία αυτά ήταν εφοδιασμένα με ανεξάρτητες δεξαμενές φορτίου αλουμινίου "Conch" και εισήλθαν στο Αλγερινό εμπόριο υγροποιημένου φυσικού αερίου το 1964. Τα πλοία αυτά είχαν χωρητικότητα 27.000 κυβικών μέτρων.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960, δημιουργήθηκε η ευκαιρία εξαγωγής υγροποιημένου φυσικού αερίου από την Αλάσκα στην Ιαπωνία και το 1969 ξεκίνησε η συναλλαγή με την

TEPCO και την Tokyo Gas. Δύο πλοία, το "Polar Alaska" και το "Arctic Tokyo", με χωρητικότητα 71.500 κυβικά μέτρα, κατασκευάστηκαν στη Σουηδία. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, η κυβέρνηση των ΗΠΑ ενθάρρυνε τα αμερικανικά ναυπηγεία να κατασκευάσουν πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου, με αποτέλεσμα να «χτιστούν» 16 συνολικά πλοία ΥΦΑ. Τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και οι αρχές της δεκαετίας του 1980 έφεραν την προοπτική πλοίων ΥΦΑ για αξιοποίηση κοιτασμάτων της Αρκτικής, με αρκετά σχέδια να βρίσκονται υπό μελέτη. Με την αύξηση της χωρητικότητας φορτίου σε περίπου 143.000 κυβικά μέτρα, αναπτύχθηκαν νέα σχέδια δεξαμενών, από το "Moss Rosenberg" μέχρι το "Technigaz Mark III" και το "Gaztransport No.96".Τα τελευταία χρόνια, το μέγεθος και η χωρητικότητα των πλοίων μεταφοράς φυσικού αερίου έχει αυξηθεί σημαντικά.

Από το 2005, η Qatargas πρωτοστάτησε στην ανάπτυξη δύο νέων κατηγοριών υγραεριοφόρων, που αναφέρονται ως "Q-Flex" και "Q-Max". Κάθε πλοίο έχει χωρητικότητα φορτίου μεταξύ 210.000 και 266.000 κυβικών μέτρων και είναι εξοπλισμένο με μονάδα επανα-υγροποίησης (reliquefication).

Η αποτύπωση του στόλου των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ έως το τέλη του 2021 φαίνεται στην εικόνα 2. Με την παράδοση 64 νέων πλοίων το 2021 και αρχές του 2022, ο συνολικός στόλος υπολογίζεται σε 641 πλοία εκ των οποίων 45 έχουν και δυνατότητα αεριοποίησης του ΥΦΑ (FSRUs), ενώ οι παραγγελίες σε εξέλιξη είναι περί τα 216 πλοία και βαίνουν αυξανόμενες.



***Εικόνα 2**: παγκόσμιος στόλος πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ*

1.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ – ΣΥΣΤΑΣΗ-ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το φυσικό αέριο είναι ένα φυσικό προϊόν το οποίο βρίσκεται σε υπόγεια κοιτάσματα της γης και είτε συναντάται μόνο του είτε συνυπάρχει με κοιτάσματα πετρελαίου. Είναι μίγμα υδρογονανθράκων σε αέρια κατάσταση, αποτελούμενο κυρίως από μεθάνιο (σε ποσοστό άνω του 85%), που είναι ο ελαφρύτερος υδρογονάνθρακας. Είναι πολύ καθαρό χωρίς προσμίξεις και θειούχα συστατικά. Είναι μια «φυσική μορφή ενέργειας» που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς ιδιαίτερη επεξεργασία και δίνει τέλεια καύση στις κατάλληλες συσκευές. Το φυσικό αέριο αποτελεί το φιλικότερο συμβατικό ορυκτό καύσιμο στο περιβάλλον και στον άνθρωπο.

Η σύσταση του φυσικού αερίου διαφέρει ανάλογα με την πηγή προέλευσής του. Οι προδιαγραφές του φυσικού αερίου δίνονται στον παρακάτω πίνακα της εικόνας 3:

Συστατικό	Μοριακός τύπος	Περιεκτικότητα (% κ.ο.)
Μεθάνιο	CH_4	70-90
Αιθάνιο, Προπάνιο, Βουτάνιο	C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}	0-20
Υδρογόνο	H_2	Ιχνη
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	0-8
Οξυγόνο	O_2	0-0.2
Άζωτο	N_2	0-5
Υδρόθειο	H_2S	0-5
Ευγενή αέρια	Ar, He, Ne, Xe	Ιχνη

Εικόνα 3: προδιαγραφές/σύσταση του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα με σχετική πυκνότητα 0,56-0,68kg/m3 (αέρας 1,293 kg/m3). Σε περίπτωση διαρροής, διαχέεται και διαφεύγει άμεσα προς την ατμόσφαιρα (σε αντίθεση με το υγραέριο που είναι βαρύτερο από τον αέρα κι επομένως σε περίπτωση διαφυγής συγκεντρώνεται «χαμηλά»).Το φυσικό αέριο είναι άοσμο, αλλά κατά τη μεταφορά του προστίθεται μια ειδική ουσία με χαρακτηριστική οσμή ώστε να ανιχνεύεται σε περίπτωση διαρροής. Τα όρια ανάφλεξης του φυσικού αερίου είναι 4,5% - 15% ,δηλαδή η καύση δεν μπορεί να συντηρηθεί εάν η περιεκτικότητα του αέρα σε φυσικό αέριο είναι εκτός αυτών των ορίων. Λόγω της σύστασής του κατά την καύση του έχει τη χαμηλότερη εκπομπή ρύπων από όλα τα συμβατικά καύσιμα. Επίσης, δεν περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα συνεπώς δεν είναι τοξικό.

Για τα αέρια έχει οριστεί μια κατάσταση αναφοράς που καλείται “κανονική” κατάσταση (και στην οποία ανάγονται οι όγκοι τους) και η οποία είναι 0°C για τη θερμοκρασία και 1,01325 bar για την πίεση. Ο όγκος ενός κυβικού μέτρου αερίου σε κανονική κατάσταση αποτελεί ένα “κανονικό κυβικό μέτρο” αερίου (1Nm3).

Ως Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (ΑΘΔ) ορίζεται η ποσότητα θερμότητας που παράγεται από την πλήρη στοιχειομετρική καύση με αέρα, ενός (1) κανονικού κυβικού μέτρου Φυσικού Αερίου σε σταθερή απόλυτη πίεση 1,01325 bar, όταν η αρχική θερμοκρασία του καυσίμου μίγματος και η τελική θερμοκρασία των προϊόντων της καύσης θεωρείται ότι είναι είκοσι πέντε (25° C) βαθμοί Κελσίου και το παραγόμενο, κατά την καύση, νερό βρίσκεται συμπυκνωμένο στην υγρή κατάσταση. Ως κανονικό κυβικό μέτρο νοείται η ποσότητα μάζας Φυσικού Αερίου που, υπό συνθήκες απόλυτης πίεσης 1,01325 bar και θερμοκρασίας μηδέν (0) βαθμών Κελσίου, καταλαμβάνει όγκο ενός (1) κυβικού μέτρου. Η τιμή της ΑΘΔ δεν είναι σταθερή καθώς εξαρτάται από τη σύσταση του φυσικού αερίου. Για παράδειγμα για το ΦΑ που παραδίδεται και καταναλώνεται στο δίκτυο της Ελλάδας, υπολογίζεται σε μηνιαία βάση από τη ΔΕΠΑ , σύμφωνα με μετρήσεις που γίνονται στους σταθμούς παραλαβής του φυσικού αερίου. Μια μέση τιμή ΑΘΔ είναι 11,5 kWh/Nm3.

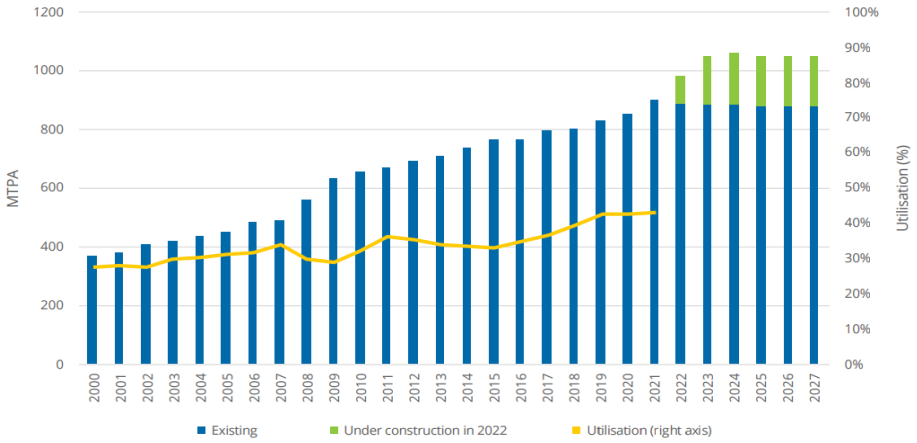
1.3 ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ - ΤΑΣΕΙΣ ΝΑΥΠΗΓΗΣΗΣ

Το ΥΦΑ άρχισε ν’ αποτελεί επιλογή ναυτικού καυσίμου πριν από αρκετά μακρύ χρονικό διάστημα, με τις πρώτες δοκιμές να φτάνουν πίσω στη δεκαετία του 1970. Ωστόσο ως καύσιμο πλοίου, ακόμη και πριν από λίγα χρόνια, το ΥΦΑ περιοριζόταν σε μεταφορείς ΥΦΑ στους οποίους αξιοποιούνταν το «ποσοστό» του φορτίου ΦΑ που εξαερώνονταν (boil-off),

λόγω αύξησης της θερμοκρασίας, καθώς και σε μικρότερα πλοία μικρών αποστάσεων , πορθμειακών γραμμών , υποστήριξης υπεράκτιων εγκαταστάσεων εξόρυξης OSV (offshore supply vessel) καθώς και άλλα πλοία παράκτιας δραστηριότητας.

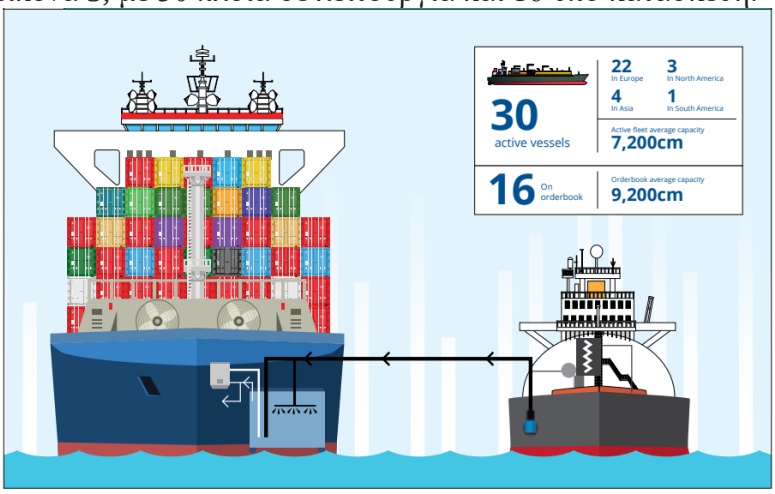
Πρόσφατα, οι παραγγελίες με καύσιμο ΥΦΑ για μεγάλα πλοία άρχισαν να «απογειώνονται», πρώτα στο τμήμα κρουαζιέρας και εμπορευματοκιβωτίων και αργότερα από άλλους τομείς της εμπορικής ναυτιλίας ήτοι φορτηγών χύδην φορτίου και δεξαμενόπλοιων. Το 2020 και το 2021, οι παραγγελίες με καύσιμο ΥΦΑ, ως προς τη χωρητικότητα, αντιπροσώπευαν σημαντικό μερίδιο της ολικής χωρητικότητας νεότευκτων για πρώτη φορά. Αυτή η αύξηση του αριθμού των μεγαλύτερων πλοίων που παραγγέλθηκαν, θα μπορούσε να προκαλέσει μια πραγματική αλλαγή για τον κλάδο, παρέχοντας την «κρίσιμη μάζα» ζήτησης ΥΦΑ, ικανή να υποστηρίξει και να επεκτείνει την ανάπτυξη της υποδομής ανεφοδιασμού ΥΦΑ σε όλο τον κόσμο.

Περαιτέρω αύξηση των μεγαλύτερων νεότευκτων πλοίων θα υποστηρίξει τη ζήτηση ΥΦΑ που απαιτείται για την ανάπτυξη υποδομών σε μεγάλα λιμάνια σε όλο τον κόσμο. Το ΥΦΑ είναι πλέον εύκολα διαθέσιμο κατά μήκος των περισσότερων μεγάλων εμπορικών οδών, με συνεχή αύξηση της δυναμικότητας των τερματικών σταθμών παραλαβής ΥΦΑ, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.



Εικόνα 4 *:Εξέλιξη της παγκόσμιας δυναμικότητας παραλαβής ΥΦΑ*

Ανάλογη αυξητική τάση παρουσιάζουν και τα πλοία εφοδιασμού ΥΦΑ ,όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 5, με 30 πλοία σε λειτουργία και 16 υπό κατασκευή.



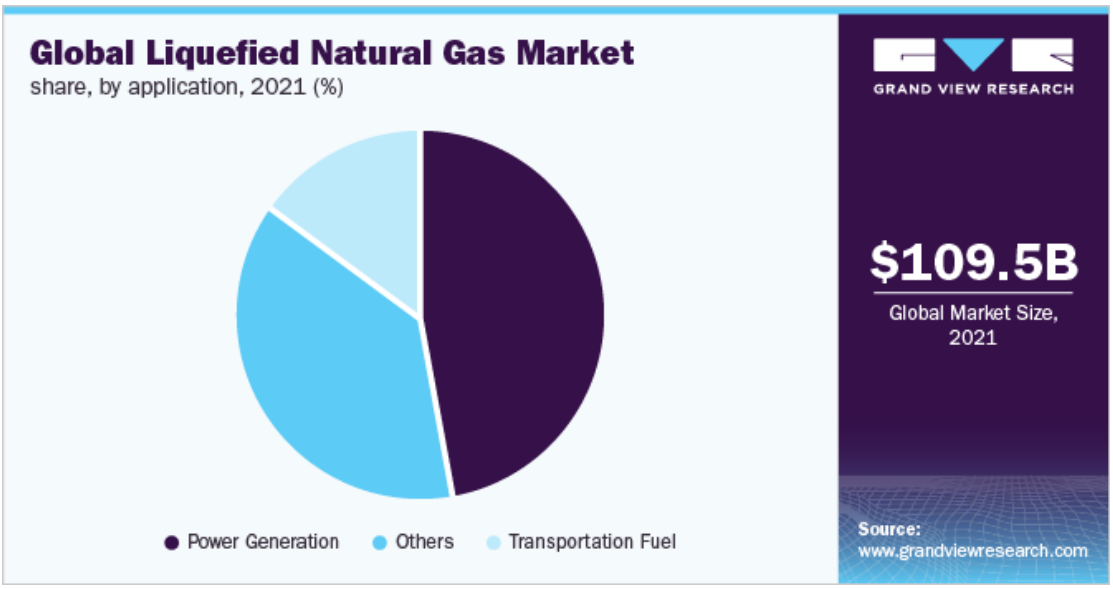
Εικόνα 5: *τρέχουσα αποτύπωση αριθμού πλοίων ανεφοδιασμού ΥΦΑ*

1.4 ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ- ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΥΦΑ ΣΤΗΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ

Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου αποτιμήθηκε σε 109,48 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2021 και αναμένεται να επεκταθεί με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 8,1% από το 2022 έως το 2030. Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω καθαρών πηγών ενέργειας είναι πιθανό να προωθήσει την ανάπτυξη της αγοράς τα επόμενα χρόνια, σε διάφορες χώρες.

Ως γνωστόν, ο άνθρακας αποτελεί την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την υποβάθμιση των αποθεμάτων άνθρακα και τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις του, έχει σημειωθεί αύξηση στη χρήση φυσικού αερίου και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Με βάση την εφαρμογή/χρήση του ΥΦΑ (βλέπε εικόνα 6), η αγορά διαχωρίζεται ως καύσιμο μεταφορών, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και άλλων χρήσεων. Το τμήμα εφαρμογών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσώπευε το μεγαλύτερο μερίδιο αξίας 47,44% το 2021. Η αυξανόμενη ζήτηση για φυσικό αέριο συμβάλλει επίσης στη μείωση των εκπομπών επιβλαβών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η αυξημένη χρήση αυτού του καυσίμου στους τομείς της εξόρυξης, της βιομηχανίας και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει παρουσιάσει σημαντική αλλαγή κατά την ιστορική περίοδο. Η πτώση των τιμών, καθώς και το χαμηλό κόστος αλλαγής καυσίμου, ενισχύουν την ανάπτυξη του κλάδου στις εφαρμογές μεταφοράς και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 6: κατανομή ΥΦΑ με βάση το πεδίο χρήσης

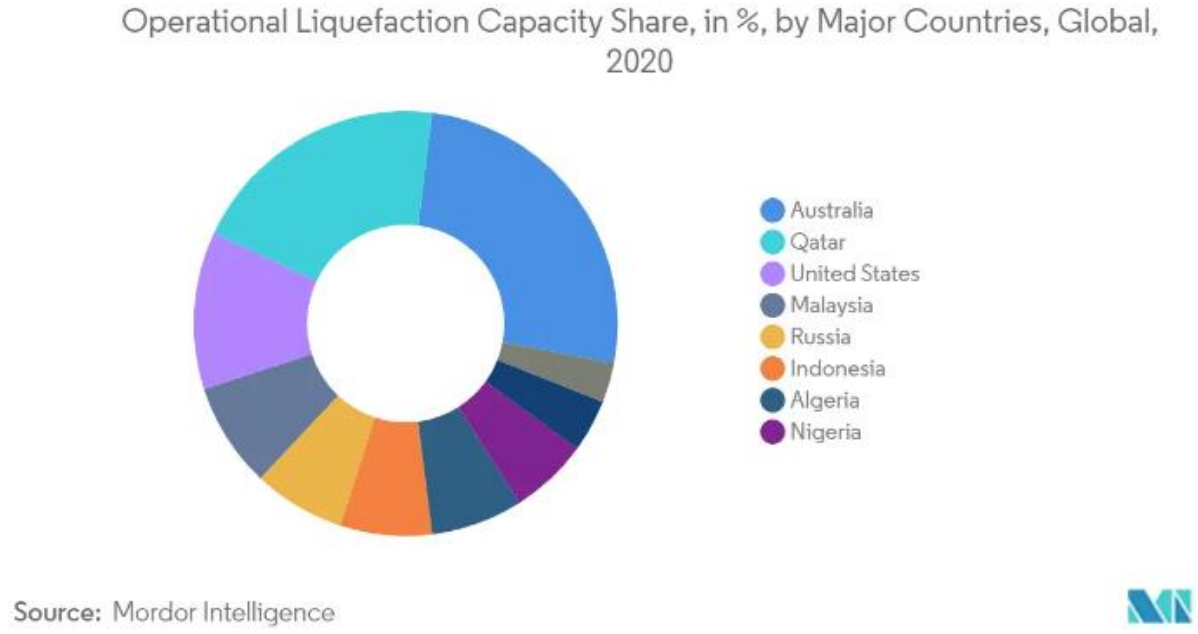
Τα πλεονεκτήματα που συνδέονται με το LNG σε συνδυασμό με την αύξηση της παραγωγής «πλούσιου» φυσικού αερίου, τόσο στην περιοχή της Βόρειας Αμερικής όσο και σε άλλες χώρες, έχουν στρέψει την προσοχή στο φυσικό αέριο και ως καύσιμο «πράσινων» μεταφορών σε σχέση με το ντίζελ και τη βενζίνη που ήταν οι προεπιλεγμένες επιλογές. Ως εκ τούτου έχει συντελεστεί μια στροφή από τα παραδοσιακά καύσιμα σε διαθέσιμες καλύτερες επιλογές στην αγορά, όπως το φυσικό αέριο που δίνει την ίδια απόδοση όσον αφορά την ισχύ, την επιτάχυνση και την ταχύτητα πλεύσης, αλλά με πρόσθετα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Το LNG είναι συνήθως λιγότερο ακριβό από το ντίζελ, παρέχοντας χαμηλότερο κόστος λειτουργίας σε μεσαίες έως μεγάλες αποστάσεις και το χαμηλότερο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Έχει επίσης ισχυρά περιβαλλοντικά οφέλη που βελτιώνουν την ποιότητα του αέρα μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ο τομέας της υγροποίησης (liquefaction) του ΦΑ παίζει σημαντικότατο ρόλο για την κυριαρχία του στην Αγορά και δει στο εξαγωγικό μέρος της δραστηριότητας. Στα τέλη του 2020, η συνολική παγκόσμια χωρητικότητα υγροποίησης έφτασε τους 454 MTPA σε 22 χώρες, αυξημένος κατά περίπου 24 MTPA από το 2019. Το 2020, πέντε νέοι μεγάλης κλίμακας σταθμοί υγροποίησης, όλοι στις Ηνωμένες Πολιτείες, εξήγαγαν τους πρώτους όγκους ΥΦΑ/LNG , καθώς και 2 στο Cameroon. Συνολικά περίπου 108 MTPA εγκαταστάσεις νέας υγροποίησης ήταν υπό κατασκευή παγκοσμίως στα τέλη του 2020.

Κατά το 2020, οι χώρες με τη μεγαλύτερη λειτουργική ικανότητα υγροποίησης LNG ήταν η Αυστραλία, ακολουθούμενες από το Κατάρ, τις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Μαλαισία, τη Ρωσία, την Ινδονησία και την Αλγερία. Η Αυστραλία ξεπέρασε το Κατάρ ως η αγορά με την υψηλότερη χωρητικότητα υγροποίησης το 2019 και ήταν επίσης η μεγαλύτερη αγορά το 2020. Ωστόσο, το Κατάρ αναμένεται να ανακτήσει τη θέση του ως η μεγαλύτερη αγορά όσον αφορά την ικανότητα υγροποίησης έως το 2026-2027. Επιπλέον, σημειώθηκε σημαντική επέκταση της παραγωγικής ικανότητας στις Ηνωμένες Πολιτείες με 23,35 MTPA χωρητικότητας υγροποίησης που προστέθηκαν το 2019 και περίπου 24 MTPA το 2020. Αυτό βοήθησε τις Ηνωμένες Πολιτείες να γίνουν ο τρίτος μεγαλύτερος παραγωγός LNG στον κόσμο, ξεπερνώντας τη Μαλαισία και τη Ρωσία.

Από το 2020, οι τρεις κορυφαίες εξαγωγικές αγορές ΥΦΑ (Αυστραλία, Κατάρ και Ηνωμένες Πολιτείες) αντιπροσώπευαν σχεδόν το 50% της παγκόσμιας ικανότητας υγροποίησης, βλέπε εικόνα 7.



Εικόνα 7*: δυναμικότητα υγροποίησης ΦΑ, ανά κύρια εξαγωγό χώρα.*

Αναφορικά με την κατανάλωση του ΥΦΑ, η Ασία εξακολουθεί να είναι η πρώτη σε εισαγωγές με μερίδιο 71% των παγκόσμιων εισαγωγών LNG το 2020, από 69% το 2019. Οι εισαγωγές αυξήθηκαν σε όλες τις ασιατικές χώρες εκτός από την Ιαπωνία, η οποία σημείωσε τη μεγαλύτερη μείωση στις εισαγωγές LNG (-2,4 MT), μετά τα μέτρα περιορισμού που εφαρμόστηκαν στη χώρα και τον καθοδικό αντίκτυπό τους στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, οι εισαγωγές LNG παρουσίασαν προοδευτική ανάκαμψη από τον Ιούνιο του 2020 και μετά, λόγω του εξαιρετικά κρύου καιρού. Παρόλα αυτά, η Ιαπωνία παραμένει η κορυφαία χώρα εισαγωγής LNG στον κόσμο με 74,4 MT ή μερίδιο αγοράς 20,9%.

Η Κίνα, όντας ο δεύτερος μεγαλύτερος εισαγωγέας LNG στην Ασία-Ειρηνικό, σημείωσε τη μεγαλύτερη ανάπτυξη όσον αφορά τους όγκους εισαγωγών (+7,2 MT ή +11,7%), η οποία ήταν χαμηλότερη από την ανάπτυξη του 2019 κατά 14%. Η Κίνα παραμένει ο δεύτερος μεγαλύτερος εισαγωγέας LNG παγκοσμίως, με 68,9 MT ή μερίδιο αγοράς 19,3% αυξημένο κατά σχεδόν 2% από το μερίδιο αγοράς του 2019 (17,4%).

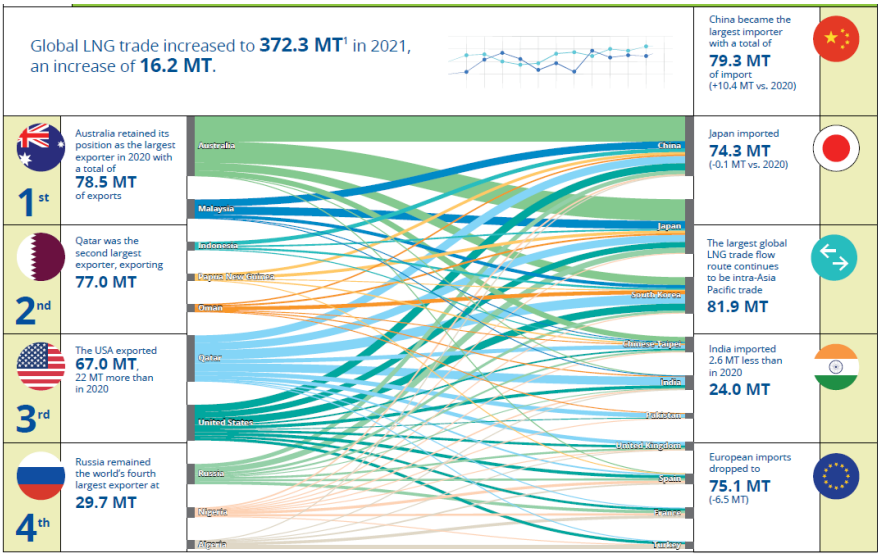
Κατά τα τελευταία έτη, οι χώρες εξαγωγής ΥΦΑ μείωσαν σημαντικά τις ποσότητες εφοδιασμού, λόγω του αρνητικού αντίκτυπου της πανδημίας COVID-19 στην παγκόσμια οικονομία. Ωστόσο το δεύτερο εξάμηνο του 2020 η παραγωγή κατέγραψε σημαντική ανάκαμψη καθώς οι όγκοι εξαγωγών ΥΦΑ κέρδισαν δυναμική με την σταδιακή επιστροφή της βιομηχανικής δραστηριότητας στα προ-COVID επίπεδα.

Ως εκ τούτου, με βάση τους προαναφερθέντες παράγοντες, η Ασία-Ειρηνικός αναμένεται να κυριαρχήσει στην παγκόσμια αγορά LNG κατά την περίοδο πρόβλεψης 2022-2027, βλέπε εικόνα 8.



Εικόνα 8: παγκόσμιος «χάρτης» ανάπτυξης χρήσης ΥΦΑ

Στην παρακάτω εικόνα 9, αποτυπώνεται το «ισοζύγιο» εξαγωγών-εισαγωγών ΦΑ κατά το έτος 2021, όπου η Αυστραλία πρωτοστατεί, ενώ κατά το 2022 αναμένεται οι ΗΠΑ να καταλάβουν την 1η θέση στις εξαγωγές ΦΑ.



Εικόνα 9: «ισοζύγιο» εισαγωγών -εξαγωγών ΥΦΑ κατά το 2021

Η παγκόσμια αύξηση στη ζήτηση ενέργειας αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του 21ου αιώνα. Το φυσικό αέριο θεωρείται ως το υποκατάστατο του πετρελαίου και το εμπόριο υγροποιημένου φυσικού αερίου μέσω της θάλασσας συνέβαλε στην ανάπτυξη της παγκόσμιας αγοράς, η οποία παρουσιάζει ομοιότητες αλλά και διαφορές με την αγορά του πετρελαίου.

Η χρήση του φυσικού αερίου ως μέσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προώθησε την ανάπτυξη του διεθνούς εμπορίου υγροποιημένου φυσικού αερίου, προκειμένου να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση στις αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες. Το φυσικό αέριο προσδίδει οικονομικά οφέλη, επεξεργάζεται πιο γρήγορα, είναι φιλικό προς το περιβάλλον, μπορεί να καεί άμεσα ως καύσιμο (στους τομείς των νοικοκυριών και της βιομηχανίας) με πολύ υψηλή απόδοση και ελάχιστες απώλειες.

1.5 ΧΡΗΣΗ ΥΦΑ ΣΤΑ ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΝΗΣΙΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ

Το ΥΦΑ (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο ή LNG) είναι φυσικό αέριο το οποίο υγροποιείται στους –162ο C, έτσι ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά του σε μακρινές αποστάσεις και η αποθήκευσή του σε μεγάλες ποσότητες. Το LNG είναι ένα καθαρό, ασφαλές, φιλικό προς το περιβάλλον καύσιμο, συμβατό με όλους τους τρέχοντες και αναμενόμενους κανονισμούς που αφορούν στον περιορισμό των εκπομπών ρύπων και πιο συγκεκριμένα:

(α) Την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2014/94 για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων, όπως ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία με το ν. 4439/20.11.2016,

(β) Την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/75 περί βιομηχανικών εκπομπών (ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης),

(γ) Την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2015/2193 για τον περιορισμό των εκπομπών ορισμένων ρύπων στην ατμόσφαιρα από μεσαίου μεγέθους μονάδες καύσης και

(δ) Την απόφαση τον Νοέμβριο του 2016 του Διεθνούς Οργανισμού Ναυτιλίας (IMO) για την εφαρμογή παγκοσμίως από 01.01.2020 ανώτατου ορίου 0,5% στην περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων.

Το ΥΦΑ μπορεί να εξασφαλίσει βιώσιμη ενεργειακή ανάπτυξη δεδομένου ότι αποτελεί λύση για την τροφοδοσία με φυσικό αέριο μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανικών, εμπορικών και οικιακών καταναλωτών σε περιοχές που βρίσκονται μακριά από τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου, όπως είναι η Δυτική Ελλάδα και η νησιωτική χώρα. Ιδιαίτερα σημαντική είναι επίσης η προοπτική της χρήσης του ως καυσίμου στις μεταφορές, οδικές και θαλάσσιες.

Για να γίνει όμως διαθέσιμο το ΥΦΑ στις ανωτέρω περιοχές/χρήσεις θα πρέπει ουσιαστικά να αναπτυχθούν και κάποιες υποδομές, οι οποίες να επιτρέπουν τη διανομή υγροποιημένου φυσικού αερίου σε μικρή κλίμακα. Αυτή τη στιγμή υπάρχει μακρόχρονη παράδοση στη βιομηχανία ΥΦΑ και ένα μεγάλης εμβέλειας διεθνές εμπόριο το οποίο αφορά στη χρήση του ΥΦΑ σε μεγάλη κλίμακα, αλλά δεν υπάρχουν σημαντικές υποδομές μικρότερης κλίμακας (SSLNG).

Μία εφοδιαστική αλυσίδα μικρής κλίμακας ΥΦΑ έχει συνήθως ως αφετηρία ένα τερματικό σταθμό εισαγωγής του ΥΦΑ, ο οποίος μπορεί να είναι είτε πλωτός ή επίγειος.

Οι πλωτοί σταθμοί -βλ. εικόνα 10- παραλαβής και αεριοποίησης ΥΦΑ είναι συνήθως πλοία μεταφοράς ΥΦΑ παλαιότερης τεχνολογίας κι άρα χαμηλότερης ενεργειακής απόδοσης αναφορικά με το μεταφορικό σκέλος, τα οποία διαθέτουν μονάδα αεριοποίησης καθώς και την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ για τις ανάγκες της μονάδας.

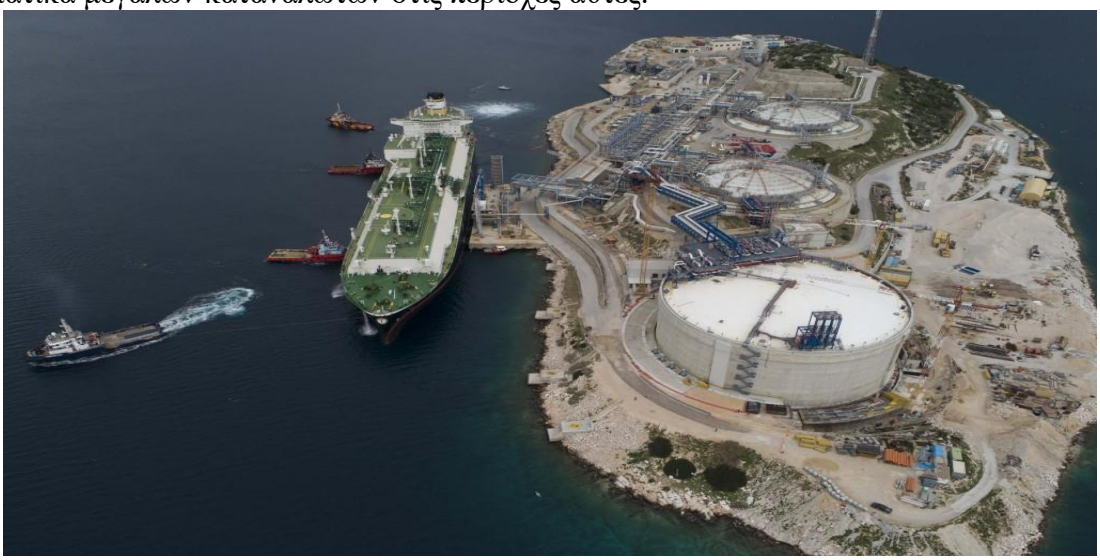
Τα περισσότερα από τα πλοία αυτά έχουν υποστεί μετατροπές (κυρίως αύξηση της διαθέσιμης ηλεκτρικής ισχύος με την εγκατάσταση επιπλέον ηλεκτροπαραγωγών ζευγών καθώς και εγκατάσταση συστήματος αεριοποίησης του ΥΦΑ) έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πλωτοί «σταθμοί» αποθήκευσης και αεριοποίησης. Αγκυροβολούν δε

κοντά στις ακτές, έτσι ώστε να συνδεθούν με ευκολία και ασφάλεια στο επίγειο δίκτυο διανομής του ΦΑ. Τα τελευταία έτη όμως κατασκευάζονται από την αρχή πλοία/ πλωτοί σταθμοί αεριοποίησης ΥΦΑ , έτσι ώστε να έχουν διττή δυνατότητα αξιοποίησης από του πλοιοκτήτες, εκμεταλλευόμενοι έτσι το χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σχέση με πλοία που μετατρέπονται εκ των υστέρων σε πλωτούς τερματικούς σταθμούς ΥΦΑ.



Εικόνα 10: πλωτός τερματικός σταθμός αποτελούμενος από πλοίο αποθήκευσης και υγροποίησης ΥΦΑ

Η άλλη επιλογή είναι επίγειος σταθμός υγροποιημένου ΦΑ όπως αυτός της Ρεβυθούσας (εικόνα 11), από τον οποίο το ΥΦΑ μεταφορτώνεται σε βυτιοφόρα ή σε μικρά πλοία μεταφοράς ΥΦΑ και μεταφέρεται/διανέμεται σε ενδιάμεσους δορυφορικούς τερματικούς σταθμούς αποθήκευσης ΥΦΑ για την τροφοδοσία νησιών ή απομακρυσμένων περιοχών ή απευθείας σε τερματικά μεγάλων καταναλωτών στις περιοχές αυτές.



Εικόνα 11: Σταθμός Ρεβυθούσας, υποδοχής δεξαμενοπλοίων ΥΦΑ, παραλαβής, αποθήκευσης και αεριοποίησης ΥΦΑ για την τροφοδοσία με Φυσικό Αέριο του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς ΦΑ

Η Ελλάδα έχει ηγετική θέση στη ναυτιλία με πάνω από 5.000 πλοία, 162 λιμάνια, περισσότερα από 53 νησιά με πληθυσμό άνω των 1000 κατοίκων και σημαντικό αριθμό μη διασυνδεδεμένων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα νησιά, που χρησιμοποιούν συμβατικά και ρυπογόνα καύσιμα (κυρίως μαζούτ). Από το 2020 και μετά προβλέπονται

αυστηρότερα όρια εκπομπών ρύπων, τόσο για νέες όσο και για υφιστάμενες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής στα νησιά.

Το ΥΦΑ ως καύσιμο επιτυγχάνει τα προβλεπόμενα νέα όρια εκπομπών και αποτελεί μία βιώσιμη εναλλακτική λύση για τη λειτουργία αυτών των μονάδων. Περαιτέρω, η δημιουργία μιας αποτελεσματικής εφοδιαστικής αλυσίδας -μικρής κλίμακας- για τη χρήση του ΥΦΑ ως καυσίμου σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής επιλεγμένων νησιών δίνει τη δυνατότητα εδραίωσης κατάλληλων συστημάτων διανομής φυσικού αερίου σε αυτά τα νησιά, ώστε να εξυπηρετηθούν και άλλοι καταναλωτές όπως βιομηχανικοί, εμπορικοί και οικιακοί.

Το ΥΦΑ είναι μία από τις δυνατές επιλογές για τη συμμόρφωση με νέα όρια εκπομπών και στις θαλάσσιες μεταφορές. Οι άλλες δύο επιλογές είναι η χρήση είτε υγρών καυσίμων μικρότερης περιεκτικότητας σε θείο είτε η εγκατάσταση συστημάτων για τον έλεγχο των εκπομπών θείου (π.χ. scrubbers). Κάθε μία επιλογή έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Θεωρείται ότι το ΥΦΑ έχει σημαντικά πλεονεκτήματα για να αποτελέσει μία από τις βασικές επιλογές των πλοιοκτητών για την συμμόρφωσή τους με τους περιορισμούς αυτούς.

Η Ελλάδα αποτελεί μία σημαντική περιοχή για την τροφοδοσία ναυτιλιακών καυσίμων και ειδικά το λιμάνι του Πειραιά θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα κέντρα για τον ανεφοδιασμό πλοίων με καύσιμα και ουσιαστικά αποτελεί ένα λιμάνι με στρατηγική θέση για την παγκόσμια αγορά ανεφοδιασμού πλοίων. Θα πρέπει λοιπόν να διατηρήσει τον ίδιο ρόλο και για την τροφοδοσία πλοίων με ΥΦΑ.

Σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα του ΥΦΑ στην Ελλάδα, αυτή υπάρχει ήδη από το 2000 όταν και λειτούργησε ο τερματικός σταθμός στη Ρεβυθούσα και υπάρχει αδιάλειπτη τροφοδοσία της χώρας με ΥΦΑ όλο αυτό το διάστημα. Όμως δεν αρκεί η ύπαρξη του βασικού τερματικού σταθμού, χρειάζεται να υπάρξει και η υποδομή σε μικρότερη κλίμακα κι εδώ υπάρχει ένα τυπικό πρόβλημα, το οποίο ουσιαστικά συμπυκνώνεται στον προβληματισμό αφενός των αγοραστών να προχωρήσουν σε αναγκαίες επενδύσεις για τη χρήση του ΥΦΑ χωρίς τις αναγκαίες υποδομές από την πλευρά της προσφοράς και αφετέρου τον αντίστοιχο προβληματισμό των προμηθευτών για τη δημιουργία αυτών των υποδομών στο βαθμό που δεν υπάρχει η αντίστοιχη ζήτηση.

Το πρόγραμμα Poseidon Med II είναι ένα Ευρωπαϊκό πρόγραμμα, το οποίο προσπαθεί να δώσει απάντηση στο πρόβλημα αυτό. Είναι ένα πρόγραμμα με πενταετή διάρκεια και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα «Συνδέοντας την Ευρώπη» κατά 50%. Έχει έναν σημαντικό προϋπολογισμό της τάξης των 53 εκ. ευρώ. Συντονιστής του προγράμματος είναι η ΔΕΠΑ και ο τεχνικός συντονιστής του προγράμματος είναι ο ΔΕΣΦΑ. Ουσιαστικά ο στόχος του Poseidon Med II είναι να δημιουργήσει τις αναγκαίες προϋποθέσεις για τη χρήση του ΥΦΑ ως ναυτιλιακό καύσιμο στην Ανατολική Μεσόγειο μέσα από τον σχεδιασμό στοχευμένων και βιώσιμων υποδομών και την επίλυση και αντιμετώπιση όλων των άλλων εκκρεμών ζητημάτων για την ύπαρξη μιας ολοκληρωμένης εφοδιαστικής αλυσίδας σε όλα τα επίπεδα. Μέσα στις δράσεις του προγράμματος είναι για παράδειγμα η διαμόρφωση των υποδομών τόσο στα λιμάνια όσο και στον τερματικό σταθμό της Ρεβυθούσας για τη δυνατότητα διανομής ΥΦΑ σε πλοία. Επίσης αντιμετωπίζονται θέματα όπως είναι το σχετικό κανονιστικό πλαίσιο για τη χρήση ΥΦΑ στη ναυτιλία, οι συνέργειες, χρηματοδοτικά εργαλεία, το σχήμα εμπορίας και τιμολόγησης του υγροποιημένου φυσικού αερίου καθώς και άλλα σχετικά θέματα. Στο Poseidon Med II συμμετέχουν 26 εταίροι που δραστηριοποιούνται σε διάφορους τομείς όπως η ενέργεια και η ναυτιλία, μεταξύ των οποίων οι Αρχές κύριων λιμένων από τρεις χώρες, την Ελλάδα (Πειραιάς, Πάτρα, Ηγουμενίτσα και Ηράκλειο), την Ιταλία (Βενετία) και την Κύπρο (Λεμεσός). Επίσης συμμετέχουν μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες αλλά και άλλες σημαντικές εταιρείες οι οποίες συμβάλλουν με την εμπειρία τους στην επίλυση και υλοποίηση όλων των δράσεων του προγράμματος. Ο στόχος

είναι να υλοποιηθούν οι δράσεις αυτές, οι οποίες θα επιτρέψουν την τροφοδοσία πλοίων από το 2020 με ΥΦΑ.

Η ΔΕΠΑ έχει εντάξει στον επιχειρησιακό της σχεδιασμό την ανάπτυξη υποδομών μικρής κλίμακας ΥΦΑ με τη συμμετοχή και ιδιωτών επενδυτών, δημιουργώντας τις προϋποθέσεις ώστε σε πρώτη φάση από το 2020 να υπάρχουν οι απαιτούμενες υποδομές καταρχήν στο λιμάνι του Πειραιά και της Πάτρας για την τροφοδοσία πλοίων με ΥΦΑ και σε ορισμένα νησιά για την τροφοδοσία μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και άλλων καταναλωτών.

Για το σκοπό αυτό έχουν υπογραφεί μνημόνια συνεργασίας :
α) μεταξύ ΔΕΠΑ και ΔΕΗ με αντικείμενο την τροφοδοσία με φυσικό αέριο νησιωτικών και άλλων περιοχών/καταναλωτών απομακρυσμένων από το Εθνικό Σύστημα Φυσικού Αερίου
β) μεταξύ ΔΕΠΑ και ATTICA GROUP, μητρική εταιρεία των Superfast Ferries και Blue Star Ferries, για τη χρήση ΥΦΑ σε πλοία του στόλου της.

Είναι σαφές ότι υπάρχουν σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη της χρήσης του ΥΦΑ στη νησιωτική χώρα και σε περιοχές απομακρυσμένες από τα δίκτυα μεταφοράς φυσικού αερίου, καθώς και στις θαλάσσιες και οδικές μεταφορές, με προφανείς θετικές επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον, όσο και στην ανάπτυξη των περιοχών αυτών, που θα μειώσουν τις σημερινές ενεργειακές και οικονομικές ανισότητες. Κρίσιμης σημασίας ζητήματα αποτελούν η ύπαρξη κατάλληλων υποδομών, καθώς και ένα γενικότερο πλαίσιο πολιτικής και κινήτρων για την περαιτέρω προώθηση της νέας αυτής προοπτικής.

2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΦΑ ΩΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ΥΦΑ θεωρείται πλέον μια ώριμη εναλλακτική επιλογή καυσίμου. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές επιλογές τεχνολογίας που πρέπει να γίνουν ανάλογα με το συγκεκριμένο σχεδιασμό του πλοίου και τις λειτουργικές/επιχειρησιακές απαιτήσεις. Οι σωστές επιλογές είναι καθοριστικές για να έναν ανταγωνιστικό σχεδιασμό και μια σύμφορη και βιώσιμη επένδυση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός πλοίου.

Η εξέλιξη των κινητήρων με καύσιμο ΥΦΑ (ΥΦΑ) για πλοία μεταφοράς ΥΦΑ (Gas tankers), υπαγορεύτηκε κατά το παρελθόν από την απόδοση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού-μηχανών, ενώ κατά τα τελευταία έτη προστέθηκε και η προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου GHG (απανθράκωση), λαμβάνοντας υπόψιν και την συνεχή επέκταση της χρήσης του ΥΦΑ και σε άλλες κατηγορίες πλοίων. Αυτές οι προσπάθειες καθοδήγησαν τη μετάβαση από τις αρχικές ατμοστροβιλικές μηχανές χαμηλής απόδοσης, στους τετράχρονους κινητήρες ντίζελ διπλού καυσίμου (DFDE) με σύστημα ηλεκτροπρόωσης και τελευταία σε 2-Χρονους αργόστροφους κινητήρες ντίζελ διπλού καυσίμου (MEGI ή X-DF) υψηλής ή χαμηλής πίεσης αερίου, μηχανικής πρόωσης.

Στους κινητήρες «διπλού καυσίμου» (Dual Fuel) υψηλής πίεσης, η καύση είναι σχεδόν πλήρης με σχεδόν μηδενική διαφυγή μεθανίου, ενώ το ΦΑ εγχέεται απευθείας στον κύλινδρο με υψηλή πίεση. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει σε κινητήρες χαμηλής πίεσης όπου το ΥΦΑ εγχέεται υπό χαμηλή πίεση και αναμιγνύεται με τον αέρα της καύσης λίγο πριν την εισαγωγή στον κάθε κύλινδρο της μηχανής.

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υγροποιημένου φυσικού αερίου διπλού καυσίμου (DF) είναι η εξέχουσα επιλογή για τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, στους οποίους μέρος του φορτίου εξαερώνεται (boil-off) κι οδηγείται για κατανάλωση είτε στις μηχανές πρόωσης ή ηλεκτροπαραγωγής. Κατά τα τελευταία χρόνια υπάρχει και η δυνατότητα επανα-υγροποίησης της ποσότητας του αερίου που έχει μεταβεί στην αέρια φάση μέσω σχετικού συστήματος (re-liquefaction plan) το οποίο ψύχει το αέριο και στη συνέχεια το επανα-υγροποιημένο ΦΑ επιστρέφει στις δεξαμενές φορτίου.

Για πλοία με καύσιμο ΥΦΑ που δεν είναι όμως μεταφορείς ΥΦΑ, η εύρεση της πιο αποτελεσματικής χρήσης του διαθέσιμου χώρου ενός σκάφους για τη δεξαμενή καυσίμου και τα σχετικά συστήματα, αποτελεί τη σημαντικότερη πρόκληση. Η αποθήκευση ΥΦΑ στο σκάφος απαιτεί περισσότερο χώρο από την αποθήκευση συμβατικών υγρών καυσίμων πετρελαίου, λόγω και της διαφοράς στη θερμογόνο δύναμη (ενέργεια). Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι το ΥΦΑ έχει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το μαζούτ και επομένως απαιτεί μεγαλύτερη αποθηκευτικό χώρο (δεξαμενές) για να παρέχει την ίδια εμβέλεια λειτουργίας. Επιπλέον, λόγω των κρυογενικών χαρακτηριστικών του ΥΦΑ, το κυλινδρικό ως επί τω πλείστων σχήμα και η μόνωση της δεξαμενής με τα απαιτούμενα συστήματα διαχείρισης αερίου, αυξάνουν τη ζήτηση χώρου.

2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΦΑ ΕΠΙ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

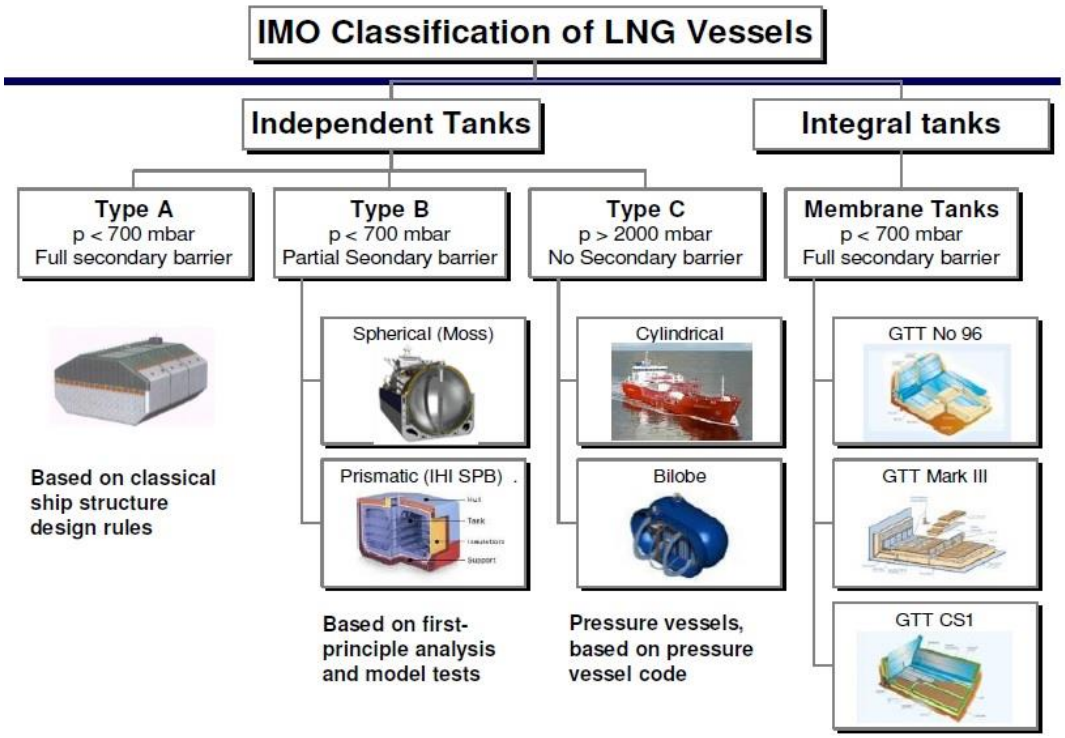
2.2.1 ΤΥΠΟΙ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Ο ΙΜΟ έχει ορίσει τρεις βασικούς, ανεξάρτητους τύπους δεξαμενών ΥΦΑ: Τύπου Α, Τύπου Β και Τύπου Γ. Επιπλέον, υπάρχουν δεξαμενές «μεμβράνης» που είναι πλήρως ενσωματωμένες στη δομή του πλοίου.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων δεξαμενών είναι:

- πίεση σχεδιασμού,
- σχεδιασμός του δευτερεύοντος φράγματος,
- σχήμα δεξαμενής,
- μέγεθος δεξαμενής

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατηγοριοποίηση των δεξαμενών για πλοία μεταφοράς ΥΦΑ κατά τον IMO:

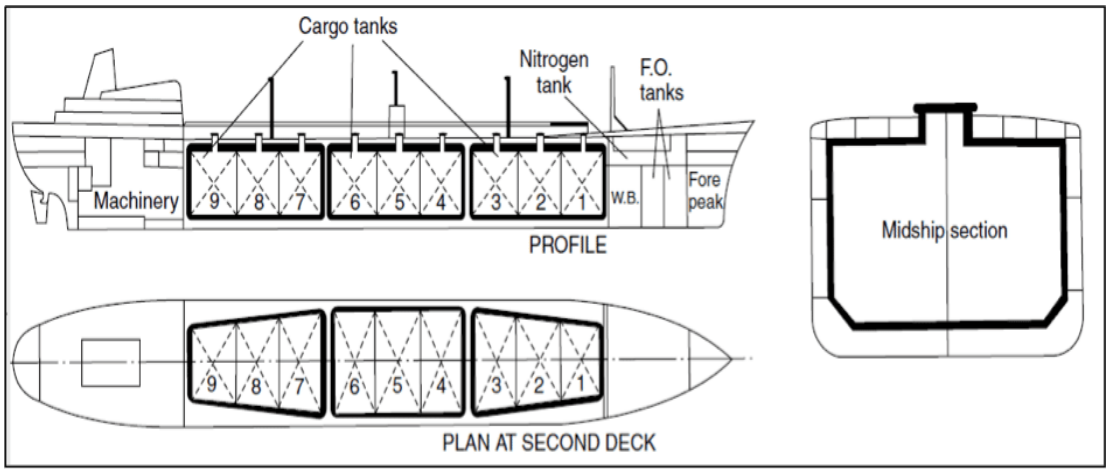


2.2.2 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΤΥΠΟΥ «Α»:

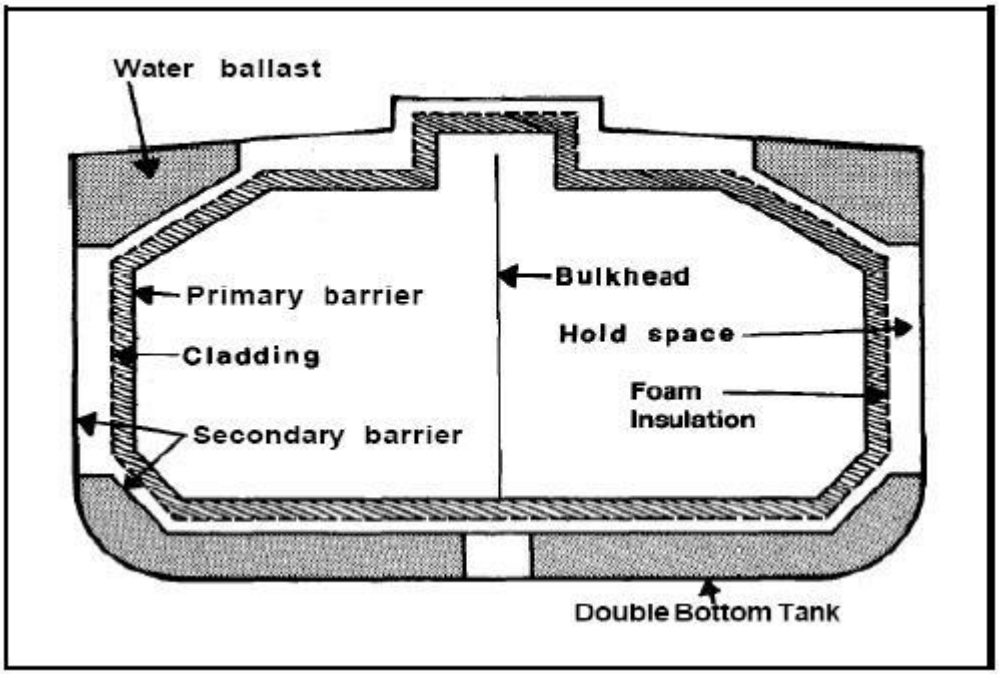
Οι δεξαμενές τύπου «Α» κατασκευάζονται κυρίως με επίπεδες επιφάνειες. Η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση σχεδιασμού δεξαμενής στον χώρο των αερίων για αυτόν τον τύπο συστήματος είναι 0,7 barg. Αυτό σημαίνει ότι τα φορτία πρέπει να μεταφέρονται σε κατάσταση πλήρους ψύξης, σε ή κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση (συνήθως κάτω από 0,25 barg). Πρόκειται για μια αυτοφερόμενη πρισματική δεξαμενή που απαιτεί συμβατική εσωτερική ενίσχυση. Οι δεξαμενές περιβάλλονται από ένα στρώμα μόνωσης αφρού, ενώ όπου χρησιμοποιείται μόνωση περλίτη, αυτή καλύπτει ολόκληρο τον κενό χώρο.

Οι δεξαμενές τύπου Α, που αρχικά αναπτύχθηκαν για μεταφορείς υγραερίου (LPG), έχουν εγκριθεί και για χρήση σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ. Το βασικό μέλημα κατά τη χρήση δεξαμενής τύπου Α για ΥΦΑ είναι η θερμοκρασία: το υγραέριο-LPG μπορεί να διατηρηθεί στους -50°C κατά τη μεταφορά, ενώ το ΥΦΑ απαιτεί ελάχιστη θερμοκρασία -160°C. Επιπλέον το υλικό που χρησιμοποιείται για τις δεξαμενές τύπου «Α» δεν είναι ανθεκτικό στη διάδοση ρωγμών. Επομένως, για να διασφαλιστεί η ασφάλεια, στην απίθανη περίπτωση διαρροής της δεξαμενής φορτίου, απαιτείται ένα δευτερεύον σύστημα περιορισμού. Αυτό το δευτερεύον σύστημα περιορισμού είναι γνωστό ως δευτερεύον φράγμα και είναι χαρακτηριστικό όλων των πλοίων με δεξαμενές τύπου «Α» ικανές να μεταφέρουν φορτία κάτω από -10° βαθμούς Κελσίου.

Στις παρακάτω εικόνες 12,13 φαίνεται η γενική διάταξη ενός πλοίου ΥΦΑ με δεξαμενές τύπου «Α». Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα 12 φαίνεται η γενική διάταξη των δεξαμενών ,ενώ στην εικόνα 13 -εγκάρσια τομή- διακρίνεται η διάταξη των επιμέρους στρωματώσεων των δεξαμενών στο «σώμα» του πλοίου.



Εικόνα 12: Γενική διάταξη δεξαμενών τύπου «Α».



Εικόνα 13: Εγκάρσια τομή πλοίου με δεξαμενή τύπου «Α».



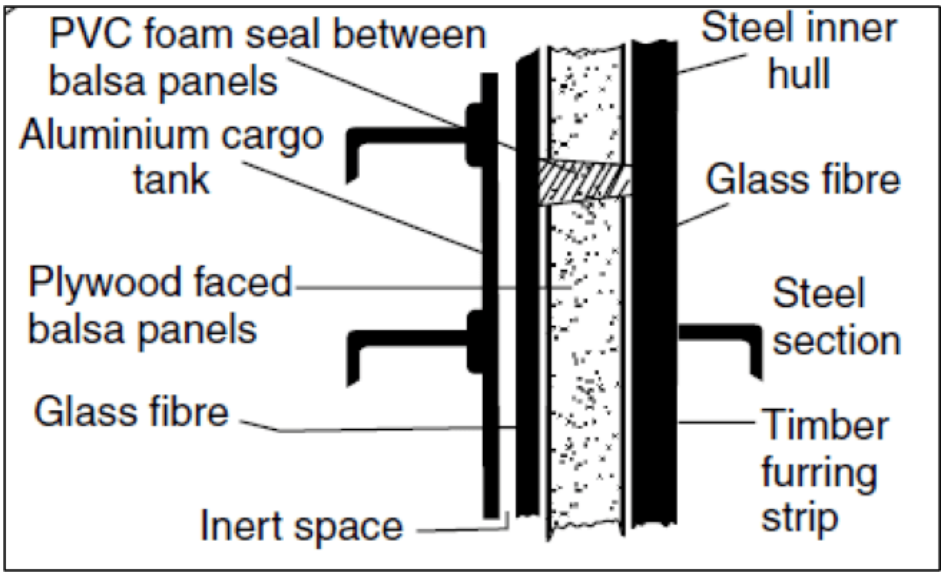
Εικόνα 14: Δεξαμενή τύπου Α κατά τη μεταφορά της για εγκατάσταση επί του πλοίου

Η γενική διάταξη ενός υγραεριοφόρου πλοίου είναι σχεδόν ίδια με αυτή ενός πετρελαιοφόρου, με τις δεξαμενές φορτίου να απλώνονται σε ένα ορισμένο μήκος προς τα εμπρός και πίσω από το μέσο του πλοίου, ενώ τα μηχανήματα και η υπερκατασκευή βρίσκονται στο πίσω μέρος. Το νερό έρματος δεν μπορεί να μεταφερθεί στις δεξαμενές φορτίου, επομένως οι χώροι για έρμα παρέχονται με την ενσωμάτωση χώρων διπλού τοιχώματος, βλέπε εικόνα 13.

Για ένα πλήρως ψυγμένο μεταφορέα υγραερίου (που δεν θα μεταφέρει φορτία κάτω από -55 βαθμούς C), το δευτερεύον φράγμα πρέπει να είναι ένα πλήρες φράγμα ικανό να συγκρατεί ολόκληρο τον όγκο της δεξαμενής σε μια καθορισμένη κλίση και μπορεί να αποτελεί μέρος του κελύφους του πλοίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 13.

Η παραπάνω αναφερόμενη σχεδιαστική προσέγγιση είναι και η επικρατέστερη. Συνεπώς τα «εμπλεκόμενα» μέρη του κύτους του πλοίου είναι κατασκευασμένα από ειδικό χάλυβα ικανό να αντέχει σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η εναλλακτική είναι η κατασκευή ενός ξεχωριστού δευτερεύοντος φράγματος γύρω από κάθε δεξαμενή φορτίου.Ο κώδικας IGC ορίζει ότι ένα δευτερεύον φράγμα πρέπει να μπορεί να συγκρατεί διαρροή δεξαμενής για περίοδο 15 ημερών.

Σε τέτοια πλοία, ο χώρος μεταξύ της δεξαμενής φορτίου (μερικές φορές αναφέρεται ως το κύριο φράγμα) και του δευτερεύοντος φράγματος είναι γνωστός ως χώρος συγκράτησης. Όταν μεταφέρονται εύφλεκτα φορτία, αυτοί οι χώροι πρέπει να γεμίζονται με αδρανές αέριο για να αποτραπεί η δημιουργία εύφλεκτης ατμόσφαιρας σε περίπτωση διαρροής του πρωτεύοντος φράγματος. Συχνά, αυτό το δευτερεύον φράγμα περιλαμβάνει τους χώρους στο κύτος του πλοίου όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 15 .



Εικόνα 15: Ενσωμάτωση δεξαμενής Τύπου Α στο κύτος του πλοίου

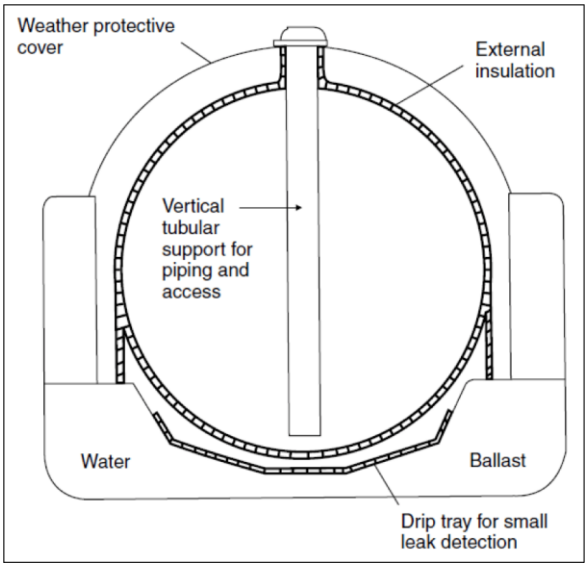
2.2.3 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΤΥΠΟΥ «Β»:

Οι δεξαμενές τύπου «Β» μπορούν να κατασκευαστούν από επίπεδες επιφάνειες ή μπορεί να είναι σφαιρικού τύπου. Αυτός ο τύπος μεταφοράς φορτίου αποτελεί αντικείμενο πολύ πιο λεπτομερούς ανάλυσης καταπονήσεων σε σύγκριση με τα συστήματα τύπου «Α». Η ιδέα πίσω από το σχεδιασμό τέτοιων δεξαμενών είναι να υπάρχει μια τέτοια δομή στην οποία μια ρωγμή να μπορεί να ανιχνευθεί πολύ πριν από την πραγματική αστοχία. Αυτό επιτρέπει ένα χρονικό περιθώριο πριν συμβεί η πραγματική αστοχία. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό τέτοιων δεξαμενών περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των επιπέδων τάσεων σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις , τον προσδιορισμό της διάρκειας κόπωσης της δομής

της δεξαμενής και τη μελέτη των χαρακτηριστικών διάδοσης των ρωγμών. Η πιο κοινή διάταξη της δεξαμενής τύπου «B» είναι μια σφαιρική δεξαμενή.

Λόγω των βελτιωμένων παραγόντων σχεδιασμού, μια δεξαμενή τύπου «B» απαιτεί μόνο ένα μερικό δευτερεύον φράγμα με τη μορφή λεκάνης συλλογής διαρροών . Η σφαιρική δεξαμενή τύπου «B» εφαρμόζεται σχεδόν αποκλειστικά σε πλοία ΥΦΑ και σπάνια εμφανίζεται σε πλοία μεταφοράς υγραερίου (LPG). Μια δεξαμενή τύπου «B», ωστόσο, δεν χρειάζεται να είναι σφαιρική.

Υπάρχουν δεξαμενές τύπου «B» πρισματικού σχήματος σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ. Όπου χρησιμοποιείται το πρισματικό σχήμα, η μέγιστη σχεδιαστική πίεση χώρου αερίων περιορίζεται, όπως για τις δεξαμενές τύπου «A», στα 0,7 barg.



Εικόνα 16α:: Σφαιρική δεξαμενή Kvaerner-Moss

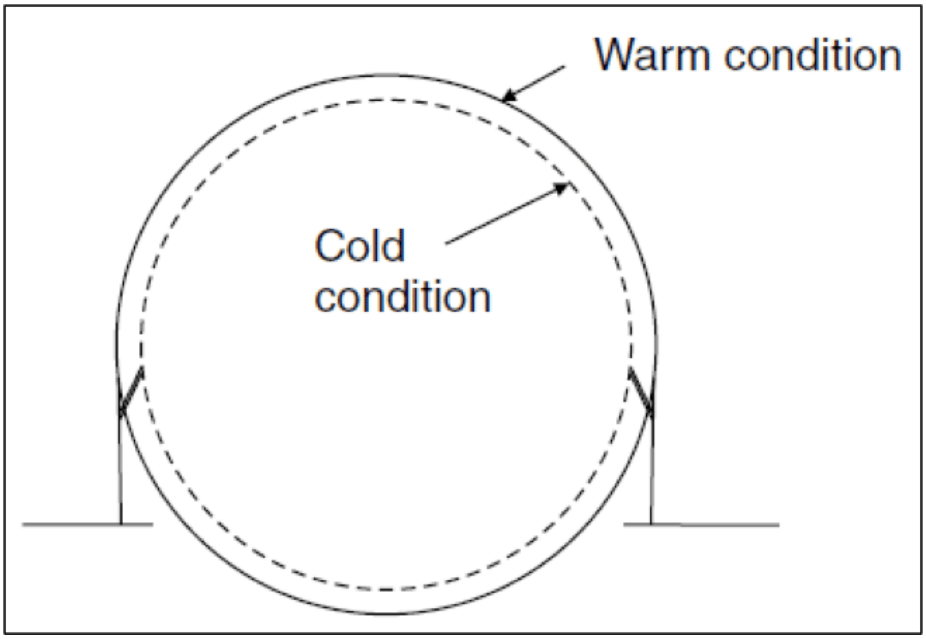
Τα περισσότερα πλοία με δεξαμενές τύπου Moss έχουν 4 ή 5 δεξαμενές, βλέπε εικόνα 16β. Η μόνωση σε αυτές τις δεξαμενές παρέχεται από παχύ στρώμα αφρού γύρω από τη δεξαμενή. Οι δεξαμενές ελέγχονται για τυχόν διαρροές από ατμόσφαιρα αζώτου σε ειδικό λεπτό στρώμα που ονομάζεται "αλουμινόχαρτο". Αυτό το στρώμα επιτρέπει επίσης στη μόνωση να παραμείνει στεγνή.



Εικόνα 16β: *Αεριοφόρο πλοίο με 5 δεξαμενές τύπου «B»*

Αυτές οι δεξαμενές είναι επιρρεπείς σε συστολή και διαστολή κατά τη διάρκεια της ψύξης και της προθέρμανσης, οι οποίες μπορούν να φτάσουν ακόμη και τα 0,6 m. Για το λόγο αυτό, όλες οι σωληνώσεις εισέρχονται στις δεξαμενές μέσω του πάνω μέρους και συνδέονται

με τις γραμμές του πλοίου μέσω εύκαμπτων συνδέσμων («τύπου φυσούνας»). Η πίεση σε αυτές τις δεξαμενές συνήθως δεν υπερβαίνει τα 55 kPa (0,55 bar), αλλά σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης μπορεί να φτάσει το 1 bar. Μια εύκαμπτη βάση επιτρέπει την ελεύθερη διαστολή και συστολή σύμφωνα με τις θερμικές συνθήκες και τέτοιες αλλαγές διαστάσεων δεν αλληλοεπιδρούν με την κύρια δομή του κύτους, όπως φαίνεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17:: Διαστολή και συστολή σφαιρικών δεξαμενών.

Τα πλεονεκτήματα των σφαιρικών δεξαμενών Kvaerner-Moss είναι τα ακόλουθα:

- Παρέχουν χώρο μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού κύτους που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έρμα και να παρέχει προστασία στο φορτίο σε περίπτωση ζημιών από πλευρική σύγκρουση.
- Το σφαιρικό σχήμα επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο θραύσης ή αστοχίας.
- Εξασφαλίζουν την εφαρμογή της αρχής «Διαρροή πριν από την αστοχία» κατά το σχεδιασμό η οποία προϋποθέτει και διασφαλίζει ότι το κύριο φράγμα (κέλυφος δεξαμενής) θα αστοχήσει σταδιακά και όχι καταστροφικά. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία ρωγμών πριν από τη διάδοση και την τελική αστοχία.

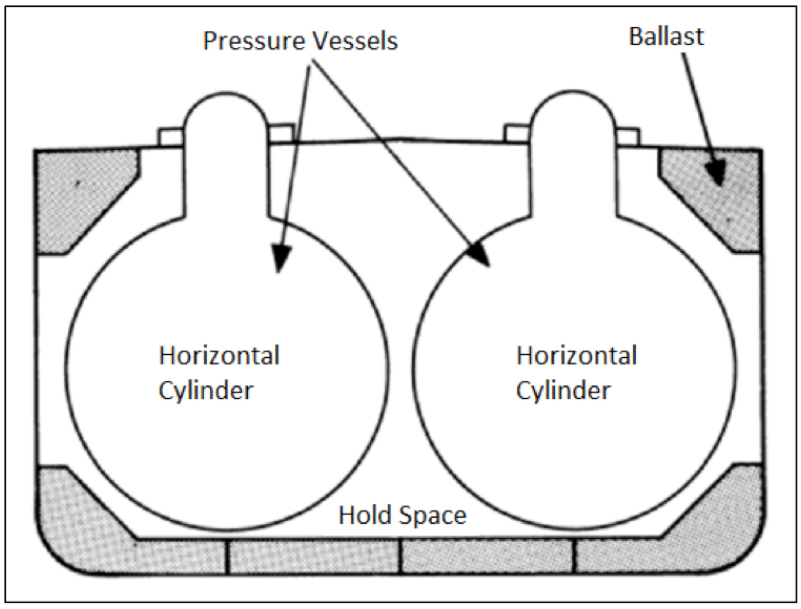
2.2.4 ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΤΥΠΟΥ «C»:

Οι δεξαμενές τύπου «C» είναι συνήθως σφαιρικά ή κυλινδρικά δοχεία πίεσης με πιέσεις σχεδιασμού υψηλότερες από 2 barg. Τα κυλινδρικά δοχεία μπορούν να τοποθετηθούν κατακόρυφα ή οριζόντια. Αυτός ο τύπος συστήματος μεταφοράς/αποθήκευσης χρησιμοποιείται τόσο σε πλοία μεταφοράς αερίου μερικής καθώς και πλήρους πίεσης.
Στην περίπτωση των πλοίων μερικής πίεσης, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά με πλήρη ψύξη, υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται κατάλληλοι χάλυβες χαμηλής θερμοκρασίας στην κατασκευή δεξαμενών. Οι δεξαμενές τύπου «C» έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με τους συμβατικούς κώδικες των δοχείων πίεσης και, ως εκ τούτου, μπορούν να υποβληθούν σε ακριβή ανάλυση καταπόνησης. Επιπλέον, οι τάσεις σχεδιασμού διατηρούνται χαμηλές. Συνεπώς, δεν απαιτείται δευτερεύον φράγμα για δεξαμενές τύπου «C» και ο κενός χώρος εξωτερικά των δεξαμενών μπορεί να γεμίσει είτε με αδρανές αέριο είτε με ξηρό αέρα.



Εικόνα 18: : δεξαμενή τύπου C

Στην περίπτωση ενός τυπικού πλοίου πλήρως υπό πίεση (όπου το φορτίο μεταφέρεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος), οι δεξαμενές μπορούν να σχεδιαστούν για μέγιστη πίεση λειτουργίας περίπου 18 barg. Για ένα πλοίο μερικής πίεσης, οι δεξαμενές φορτίου και ο σχετικός εξοπλισμός έχουν σχεδιαστεί για πίεση εργασίας περίπου 5 έως 7 barg και κενό 0,5 barg. Τυπικά, οι χάλυβες δεξαμενών για τα «ημι-πεπιεσμένα» πλοία είναι ικανοί να αντέχουν σε θερμοκρασίες μεταφοράς -48 βαθμούς °C για το υγραέριο ή -104 βαθμούς °C για το αιθυλένιο. (Φυσικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και φορέας αιθυλενίου για τη μεταφορά υγραερίου). Οι δεξαμενές τύπου «C» λόγω του σχήματος οδηγούν σε σχετικά κακή χρήση του όγκου του κύτους. Ωστόσο, αυτό μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση τεμνόμενων δοχείων πίεσης ή δεξαμενών τύπου διπλού λοβού που μπορούν να σχεδιαστούν με κωνικό το μπροστινό άκρο, για καλύτερη αξιοποίηση του πρωραίου μέρους του πλοίου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται διάταξη «δίλοβων» δεξαμενών σε τομή στο μέσο του πλοίου. Οι κύλινδροι μπορούν να τοποθετηθούν είτε κάθετα είτε οριζόντια, ανάλογα με τις διαστάσεις και τους χωρικούς περιορισμούς του πλοίου. Όπως φαίνεται , στην εικόνα 19, ο χώρος μεταξύ των δύο κυλίνδρων καθίσταται άχρηστος. Εξαιτίας αυτού, η χρήση κυλινδρικών δεξαμενών είναι μη-ενδεδειγμένη εξαιτίας της μερικής αξιοποίησης του διαθέσιμου όγκου του πλοίου.

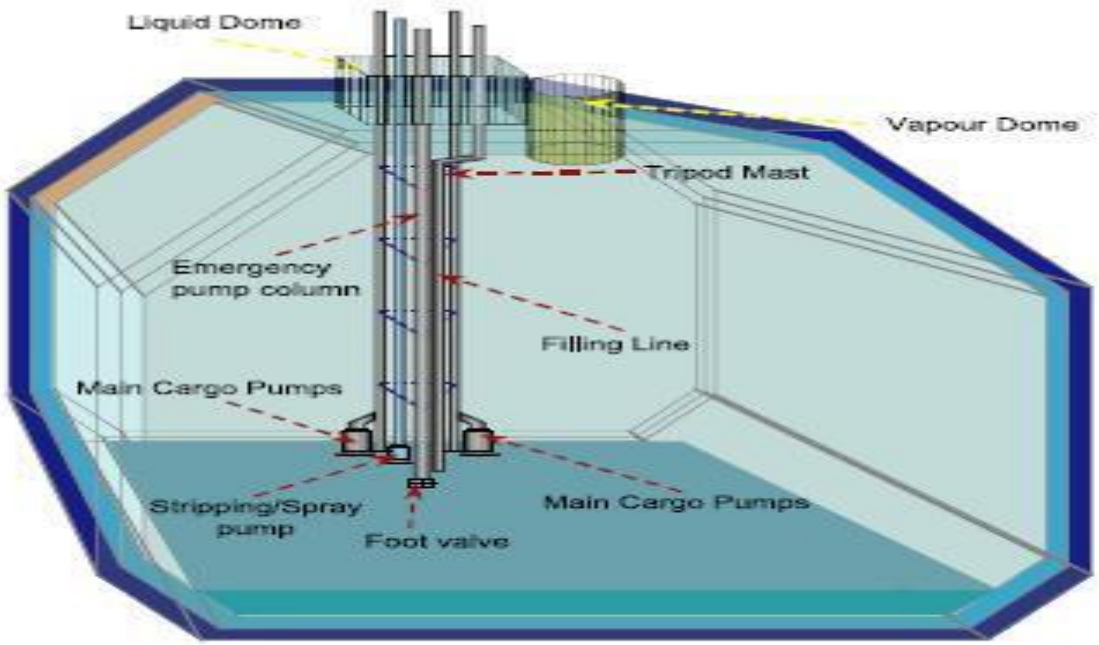


Εικόνα 19:*: Οριζόντιες σφαιρικές δεξαμενές σε πλοίο ΥΦΑ.*

Δεξαμενές μεμβράνης:

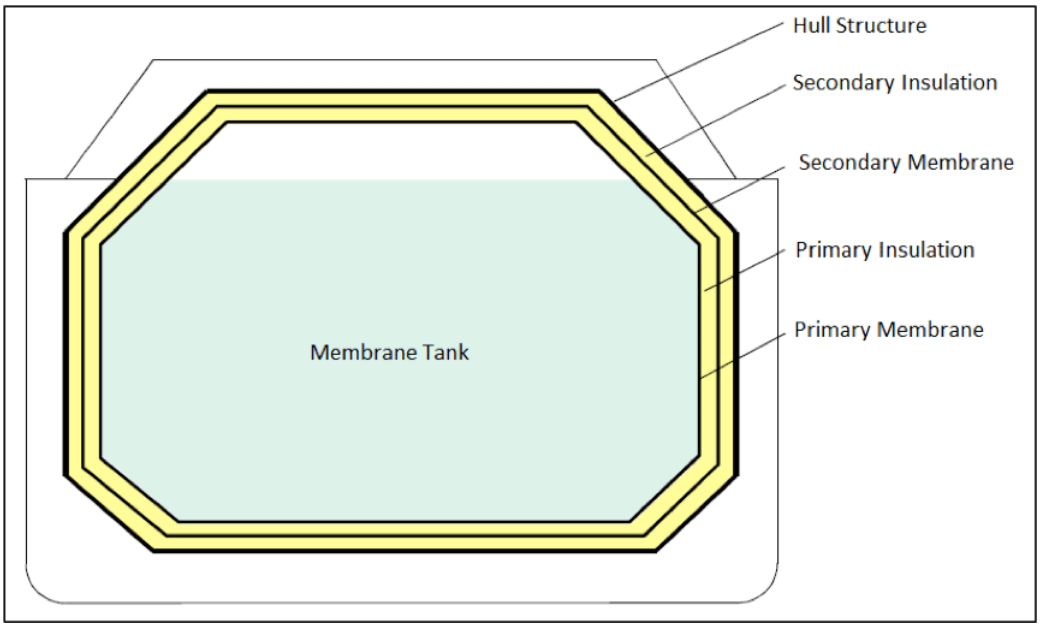
Σε αντίθεση με τις ανεξάρτητες δεξαμενές, οι δεξαμενές μεμβράνης είναι μη αυτοφερόμενες κατασκευές. Το κύριο τοίχωμά τους αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα μεμβράνης (πάχους 0,7 έως 1,5 mm). Η μεμβράνη υποστηρίζεται από την εσωτερική δομή του κύτους μέσω μιας μόνωσης που μπορεί να κυμαίνεται σε πάχος έως και 10 mm σύμφωνα με τον κώδικα IMO IGC. Λόγω του μη αυτοφερόμενου χαρακτήρα τους, το εσωτερικό κύτος παραλαμβάνει τα φορτία που μεταδίδονται στη δεξαμενή. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαστολές και οι συστολές λόγω θερμικών διακυμάνσεων αντισταθμίζονται μη επιτρέποντας την ανάληψη της τάσης από την ίδια τη μεμβράνη.

Τα συστήματα αποθήκευσης μεμβράνης πρέπει πάντα να είναι εφοδιασμένα με ένα δευτερεύον φράγμα για να διασφαλίζεται η ακεραιότητα του συνολικού συστήματος σε περίπτωση διαρροής του πρωτογενούς φράγματος. Οι δεξαμενές μεμβράνης χρησιμοποιούνται κυρίως για μεταφορά ΥΦΑ.



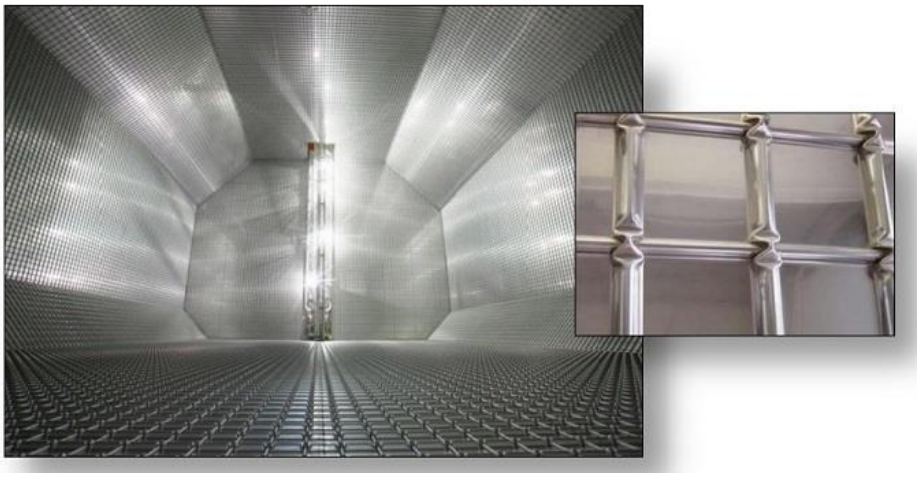
Εικόνα 20:*: Δεξαμενή τύπου μεμβράνης*

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι δεξαμενών μεμβράνης είναι αυτοί που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν από δύο γαλλικές εταιρείες Technigaz και Gaz Transport. Το σύστημα Technigaz χρησιμοποιεί ένα σύστημα από ανοξείδωτο χάλυβα που είναι κατασκευασμένο με κυματοειδές φύλλο με τέτοιο τρόπο ώστε ένα φύλλο να μπορεί να διαστέλλεται ή να συστέλλεται ελεύθερο ανεξάρτητα από το διπλανό φύλλο. Το σύστημα Gaz Transport χρησιμοποιεί "Invar" (κράμα σιδήρου ,νικελίου) ως πρωτεύουσες και δευτερεύουσες μεμβράνες. Το Invar έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, γεγονός που καθιστά περιττές τις αυλακώσεις. Η μόνωση είναι συνήθως κατασκευασμένη από υλικά όπως η ενισχυμένη πολυουρεθάνη. Στις δεξαμενές μεμβράνης GTT, η κύρια μεμβράνη είναι κατασκευασμένη από κυματοειδές SUS 304 και η δευτερεύουσα μεμβράνη από Glued Triplex. Η εικόνα 21 απεικονίζει τομή δεξαμενής διπλής μεμβράνης.



Εικόνα 21: ανατομία δεξαμενής τύπου μεμβράνης

Στην παρακάτω εικόνα 22 φαίνεται το εσωτερικό δεξαμενής τύπου μεμβράνης καθώς και η κυματοειδής διαμόρφωση του εσωτερικού τοιχώματος.



Εικόνα 22: εσωτερικό δεξαμενής τύπου μεμβράνης

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των δεξαμενών μεμβράνης είναι τα εξής:

- Καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο μέσα στο κύτος ,αυξάνοντας την ωφέλιμη χωρητικότητα του πλοίου .
- Για τον παραπάνω λόγο, ο μέγιστος χώρος στο αμπάρι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά του φορτίου.
- Δεδομένου ότι το ύψος των δεξαμενών πάνω από το κύριο κατάστρωμα είναι σημαντικά μικρότερο σε σύγκριση με τις περιπτώσεις των δεξαμενών Moss, οι δεξαμενές μεμβράνης παρέχουν δυνατότητα ορατότητας από τη γέφυρα πλοήγησης. Αυτό επιτρέπει επίσης «γέφυρα» πλοίου χαμηλότερου ύψους, βλ. εικόνα 23.



Εικόνα 23: πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ με δεξαμενές τύπου μεμβράνης

Μια σημαντική απαίτηση του κώδικα IGF είναι το σύστημα αποθήκευσης να μπορεί να αποτρέπει την απελευθέρωση φυσικού αερίου στην ατμόσφαιρα (για την αποφυγή υπερπίεσης στις δεξαμενές) για περίοδο 15 ημερών.

Ο έλεγχος της πίεσης στις δεξαμενές επιτυγχάνεται με τους παρακάτω τρόπους:

• Κατανάλωση του ΥΦΑ που αεριοποιείται λόγω μείωσης της θερμοκρασίας (boil-off), για την παραγωγή ενέργειας στο πλοίο μέσω είτε κινητήρων εσωτερικής καύσης ή λέβητες για την κίνηση ατμοστροβίλων κ.λ.π.

• Εκ νέου υγροποίηση

• Θερμική οξείδωση του αερίου (μονάδα καύσης αερίου, GCU-Gas Combustion Unit)

• Συσσώρευση πίεσης

2.3 ΤΥΠΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ & ΠΡΟΩΣΤΗΡΙΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Αρχικά θα πρέπει ν' αναφερθεί ότι όλα τα συστήματα πρόωσης στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, χρησιμοποιούν το αέριο του φορτίο που μεταβαίνει στην αέρια φάση λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας (Boil-off). Στην πρώτη γενιά τέτοιων πλοίων το αέριο αυτό χρησιμοποιούνταν «αποκλειστικά» για την παραγωγή ενέργειας λόγω έλλειψής άλλων μεθόδων αξιοποίησης. Με την ανάπτυξη μεθόδων επανα-υγροποίησης, δόθηκε η δυνατότητα το αέριο που προκύπτει λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στις δεξαμενές φορτίου να επιστρέφει στην υγρή φάση, έτσι ώστε να αποδίδεται μεγαλύτερη ποσότητα ΥΦΑ στους παραλήπτες, ενώ η παραγωγή ενέργειας στο πλοίο να γίνεται εναλλακτικά από υγρά καύσιμα.

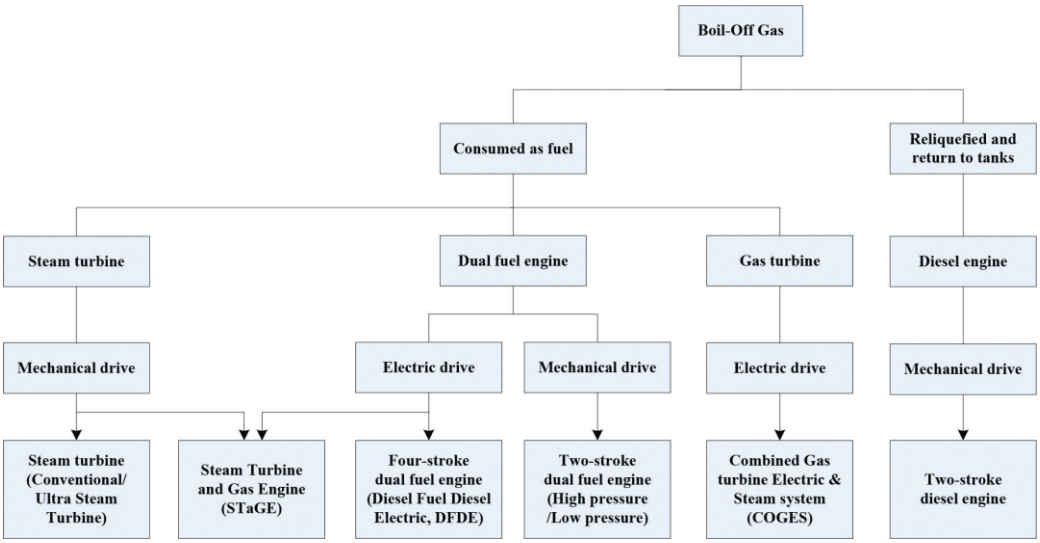
Στην παρακάτω εικόνα 24 φαίνονται όλες οι δυνατότητες αξιοποίησης του ΥΦΑ το οποίο αεριοποιείται καθώς και όλα τα σχήματα παραγωγής ισχύος (πρόωσης και ηλεκτροπαραγωγής) σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ.

Με βάση τους πρωταρχικούς κινητήρες και με τους συνδυασμούς τους, έχουμε έξι επιλογές συστήματος πρόωσης ήτοι¨

- ατμοστροβίλου,
- συνδυασμό ατμοστροβίλου και ντίζελ αερίου,
- ηλεκτρική πρόωση με μηχανές ντίζελ διπλού καυσίμου,
- μηχανική πρόωση με αργόστροφο κινητήρα διπλού καυσίμου,
- πρόωση αεριοστρόβιλου,
- πρόωση με αργόστροφο κινητήρα ντίζελ με σύστημα επανα-υγροποίησης και

- υβριδικό σύστημα πρόωσης που βασίζεται σε ατμοστρόβιλο και κινητήρα αερίου.

Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν τα συνηθέστερα στην πράξη τρία (3) συστήματα, τα οποία έχουν και τη συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών στον κλάδο των πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ και πιο συγκριμένα: ατμοστροβίλου, ηλεκτρική πρόωση με μεσόστροφες μηχανές ντίζελ διπλού καυσίμου, μηχανική πρόωση με αργόστροφο κινητήρα διπλού καυσίμου και σύστημα επανα-υγροποίησης .



Εικόνα 24: διάγραμμα εκμετάλλευσης του ΥΦΑ το οποίο αεριοποιείται και σχήματα παραγωγής ισχύος (πρόωσης και ηλεκτροπαραγωγής) σε πλοία μεταφοράς ΥΦΑ

2.3.1 ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κατά το παρελθόν στα πρώτα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, οι κινητήριες μονάδες καθώς και αυτές που παρείχαν την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια για τις ανάγκες του πλοίου ήταν ατμοστροβιλικές. Το ΥΦΑ που εξαερώνονταν στις δεξαμενές αποθήκευσης/φορτίου, οδηγούνταν σε ατμολέβητα για την καύση και παραγωγή ατμού, ο οποίος στη συνέχεια κινούσε τόσο το προωστήριο σύστημα ατμοστροβίλων (πρωτεύων και δευτερεύων) όσο και τις ατμοστροβιλικές γεννήτριες.

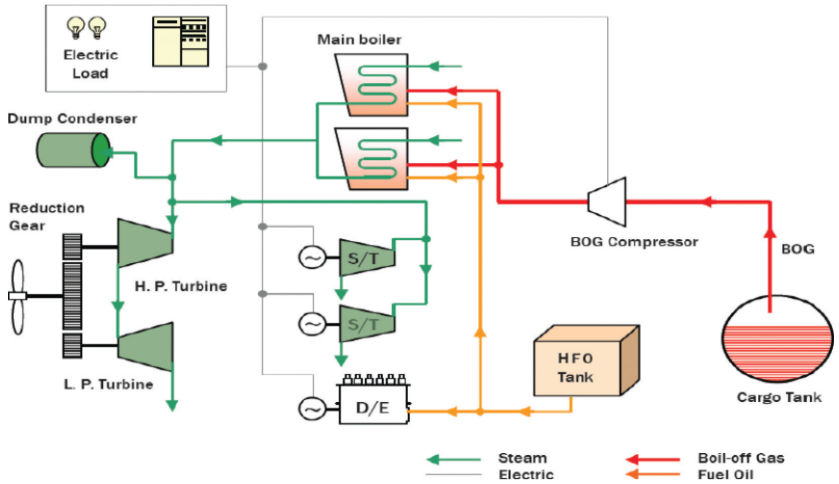
Ο βαθμός απόδοσης του εν λόγω συστήματος ήταν σχετικά χαμηλός (~30%), αλλά τόσο η μόνωση των πρώτων δεξαμενών που επέτρεπαν σημαντικό ποσοστό εξαέρωσης του φορτίου σε συνδυασμό με την ανυπαρξία συστημάτων επανα-υγροποίησης, όσο και (κυρίως) η ανυπαρξία άλλων ενναλακτικών λύσεων κατέστησε την τεχνολογία αυτή δόκιμη για τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ.

Μια τυπική διάταξη ατμοστροβιλικής εγκατάστασης σε πλοίο μεταφοράς ΥΦΑ φαίνεται στην εικόνα 25. Το σύστημα πρόωσης που βασίζεται σε ατμοστρόβιλο συνήθως περιλαμβάνει λέβητες δύο καυσίμων με αέριο/HFO, που παρέχουν υπέρθερμο ατμό υψηλής πίεσης, συνήθως 60–70 bar στους 520°C, στους στροβίλους υψηλής και χαμηλής πίεσης που κινούν μία μόνο έλικα μέσω κιβωτίου/μειωτήρα. Ο ατμός χρησιμοποιείται επίσης για την τροφοδοσία ατμοστροβιλικών γεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για βοηθητικές υπηρεσίες (π.χ. φορτίο ξενοδοχείου, τροφοδοσία αντλιών).

Δύο στροβιλογεννήτριες είναι εγκατεστημένες για να εξασφαλίζουν την αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ η κάθε μία έχει ονομαστική ισχύ ικανή να καλύψει τη ζήτηση φορτίου αιχμής η οποία είναι συνήθως κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης του φορτίου. Τοποθετούνται επίσης δύο βοηθητικοί κινητήρες ντίζελ, με συνολική ισχύ ίση με την ισχύ καθενός από τα σετ στροβιλογεννητριών, ως απαίτηση ασφαλείας για την παροχή ικανοποιητικής ισχύος για την αντιμετώπιση πιθανών μπλακ-άουτ.

Το υπερβολικό αέριο εξαέρωσης (BOG) που δημιουργείται σε καταστάσεις όταν ο ατμοστρόβιλος είναι εκτός λειτουργίας ή σε χαμηλό φορτίο καίγεται επίσης στο λέβητα και ο παραγόμενος ατμός απορρίπτεται στον συμπυκνωτή, διαχέοντας την ενέργεια στη θάλασσα. Μέσω αυτής της απλής φιλοσοφίας είναι σε θέση να σταθεροποιήσει την πίεση της δεξαμενής, εξαλείφοντας την ανάγκη για μονάδα καύσης αερίου (GCU).

Οι λέβητες μπορούν να καίνε το βαρύ μαζούτ (HFO) και το αέριο «βρασμού» (BOG) ταυτόχρονα σε οποιαδήποτε αναλογία υγρού/αερίου, προσφέροντας έτσι μια πολύ εύκολη μέθοδο χειρισμού του BOG. Επιπλέον, η πρόωση μέσω ατμοστροβίλου χαρακτηρίζεται επίσης από ευκολία στη χρήση, εγγενή αξιοπιστία και μειωμένο κόστος συντήρησης. Ωστόσο, η εγκατάσταση ατμοστροβίλου έχει τη χαμηλότερη συνολική απόδοση του συστήματος πρόωση η οποία κυμαίνεται στο 35% περίπου σε πλήρες φορτίο ενώ η απόδοση γίνεται χαμηλότερη καθώς μειώνεται το φορτίο του στροβίλου, το οποίο άμεσα οδηγεί σε υψηλό κόστος καυσίμου, με επακόλουθες και τις υψηλές εκπομπές CO2.



Εικόνα 25: σχηματική τυπική διάταξη ατμοστροβιλικής εγκατάστασης

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται και η πραγματική διάταξη του ζεύγους των ατμοστροβίλων οι οποίοι συμπλέκονται στο μειωτήρα στροφών όπου μέσω του αξονικού συστήματος μεταδίδεται η ισχύς στην έλικα του πλοίου. Από την εικόνα γίνεται ξεκάθαρη η πολύ χαμηλή χωροταξική διάταξη του συστήματος η οποία οδηγεί σε πολύ άνετα μηχανοστάσια και «ελάχιστο» αριθμό κινούμενων μερών σε σχέση με τις επόμενες τεχνολογίες που θα αναπτυχθούν.



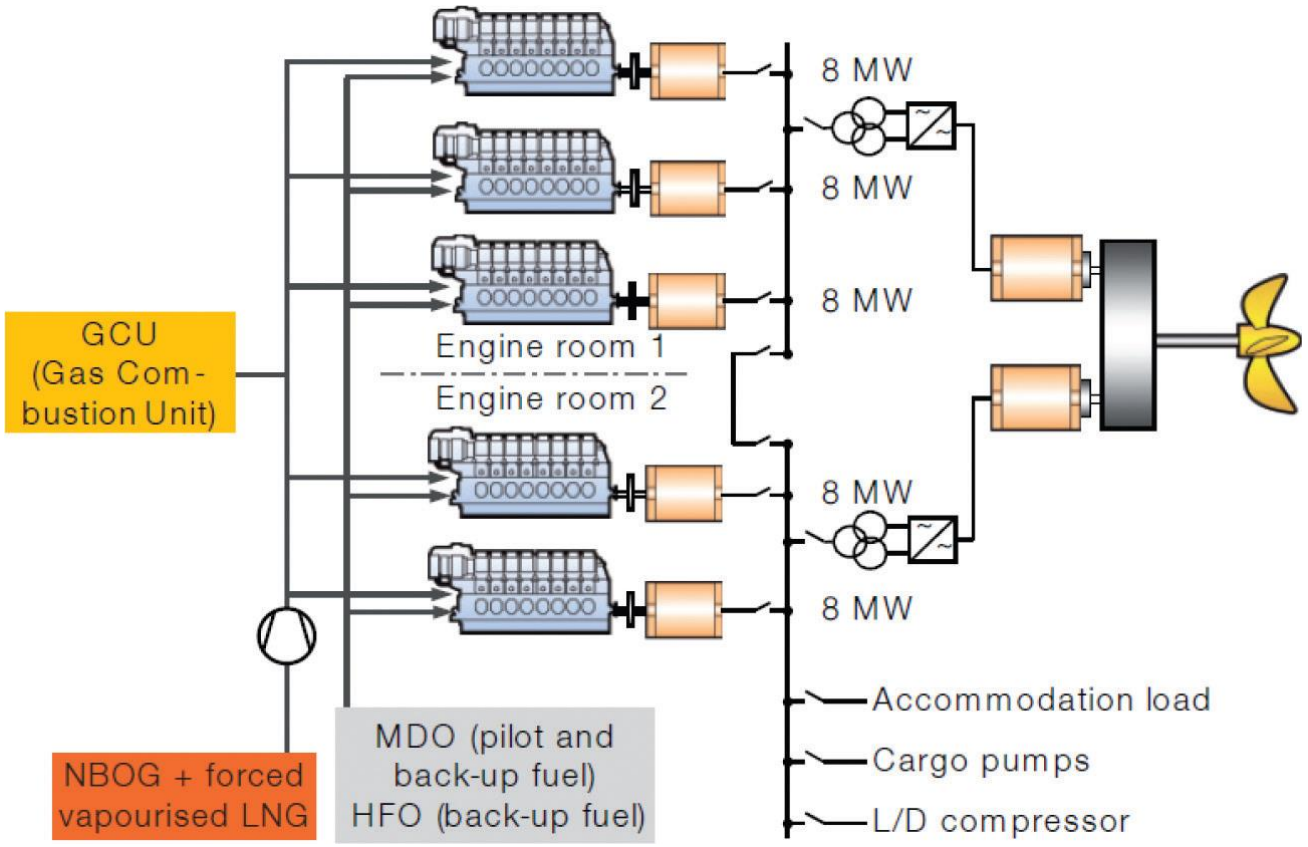
Εικόνα 26α: διάταξη ζεύγους των ατμοστροβίλων σε μηχανοστάσιο πλοίου μεταφοράς ΥΦΑ.

Η τεχνολογική εξέλιξη των Μ.Ε.Κ. -οι οποίες όπως θα δούμε παρακάτω, έχουν σημαντικά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από μια ατμοστροβιλική εγκατάσταση- που παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας τους με ΦΑ και υγρό καύσιμο, εκτόπισε ολοκληρωτικά και σε μικρό χρονικό διάστημα τους ατμοστροβίλους, μονοπωλώντας σήμερα όλες τις εφαρμογές ισχύος με ΥΦΑ.

2.3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ ΜΕ ΜΕΣΟΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΝΤΙΖΕΛ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

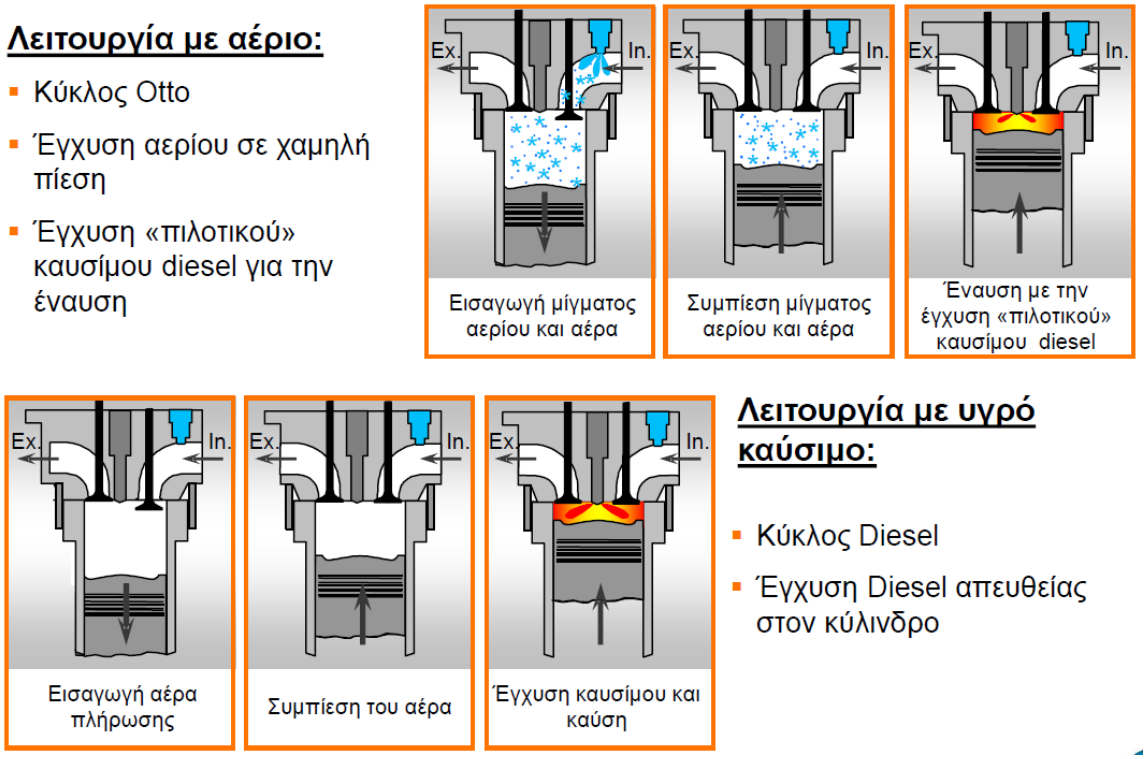
Η επόμενη γενιά πλοίων , που χρησιμοποιεί ΥΦΑ ως καύσιμο, εξοπλίστηκε με σύστημα ηλεκτροπρόωσης και μεσόστροφες 4-χρονες μηχανές διπλού, εκτοπίζοντας πλήρως την ατμοστροβιλική πρόωση. Η διάταξη αυτή (Dual Fuel Diesel Electric,DFDE) παρέχει μεγάλη ευελιξία και εφεδρεία (redundancy).

Το σύστημα χρησιμοποιεί πολλαπλούς κινητήρες του ίδιου τύπου με διαφορετικές ή και όμοια διάταξη κυλίνδρων (π.χ. 3x12V50DF+1x6L50DF ή 4x9L50DF κλπ.), συνήθως τέσσερις ή πέντε, οι οποίοι κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τα ζεύγη να τοποθετούνται σε 2 μηχανοστάσια. Η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται τόσο για την πρόωση του πλοίου ,η οποία είναι και ο κύριος ηλεκτρικός καταναλωτής, όσο και για τις υπόλοιπες «ηλεκτρικές» ανάγκες του πλοίου. Η πρόωση του πλοίου πραγματοποιείται μέσω 2 ηλεκτροκινητήρων και 2 ελίκων ή μειωτήρα και ηλεκτροκινητήρων σε περίπτωση διάταξης με 1 έλικα. Η σχηματική εικόνα ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης με 5 κινητήρες και μονή έλικα φαίνεται παρακατω:



Εικόνα 26β: *σύστημα ηλεκτροπρόωσης με 5 κινητήρες διπλού καυσίμου, μειωτήρα στροφών και μονή έλικα*

Οι κινητήρες διπλού καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν είτε με αέριο που εξαερώνεται στις δεξαμενές φορτίου , ντίζελ, ή μαζούτ (BOG, MDO HFO) . Οι κινητήρες «διπλού» καυσίμου έχουν διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας ανάλογα με το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί. Όταν καίγεται αέριο ως καύσιμο (λειτουργία αερίου), ο κινητήρας υιοθετεί την αρχή του «φτωχού» κύκλου Otto (lean burn). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται μία πηγή θερμότητας για την έναυση του αερίου μίγματος η οποία για τους συγκεκριμένους κινητήρες είναι η έγχυση μικρής ποσότητας πιλοτικού καυσίμου Diesel. Αντιθέτως, εάν χρησιμοποιούνται MDO ή HFO, ο κινητήρας λειτουργεί σε κύκλο ντίζελ (λειτουργία ντίζελ). Στην παρακάτω εικόνα 27, φαίνονται οι 2 αρχές λειτουργίας ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου.



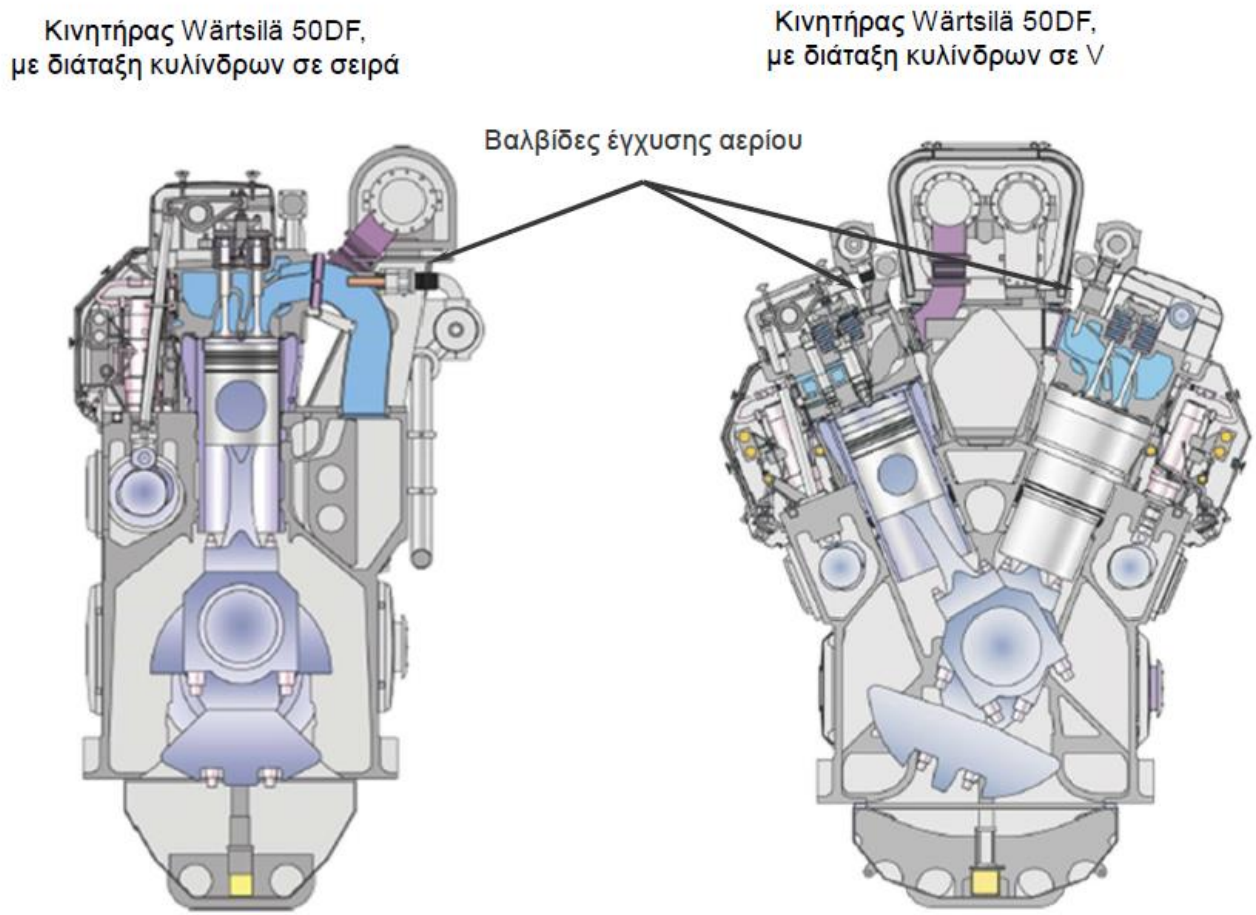
***Εικόνα 27**: αρχές λειτουργίας μηχανής διπλού καυσίμου.*

Στην κατηγορία αυτής της διάταξης πρόωσης, έχουν επικρατήσει οι μηχανές της κατασκευάστριας WARTSILA και ειδικότερα ο τύπος 50DF. Παρακάτω στην εικόνα 28 φαίνονται τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του εν λόγω κινητήρα.

Διάμετρος Κυλίνδρου	***500 mm***
Διαδρομή εμβόλου	***580 mm***
Όγκος εμβολισμού («κυλινδρισμός»)	***113,9 l/cyl***
Αριθμός βαλβίδων κυλίνδρου	***2 εισαγωγής, 2 εξαγωγής***
Διάταξη κυλίνδρων	***6,8,9 σε σειρά-12,16 σε διάταξη V***
Γωνία V	***45°***
Φορά περιστροφής	***Δεξιόστροφη***
Ταχύτητα περιστροφής	***500,514 στροφές/ λεπτό (rpm)***

***Εικόνα 28**:* βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα 50DF της κατασκευάστριας WARTSILA

Στην παρακάτω εικόνα 29, φαίνονται οι κινητήρες αυτού του τύπου σε τομή τόσο αυτού της διάταξης κυλίνδρων σε σειρά όσο και αυτού με διάταξη κυλίνδρων σε V.

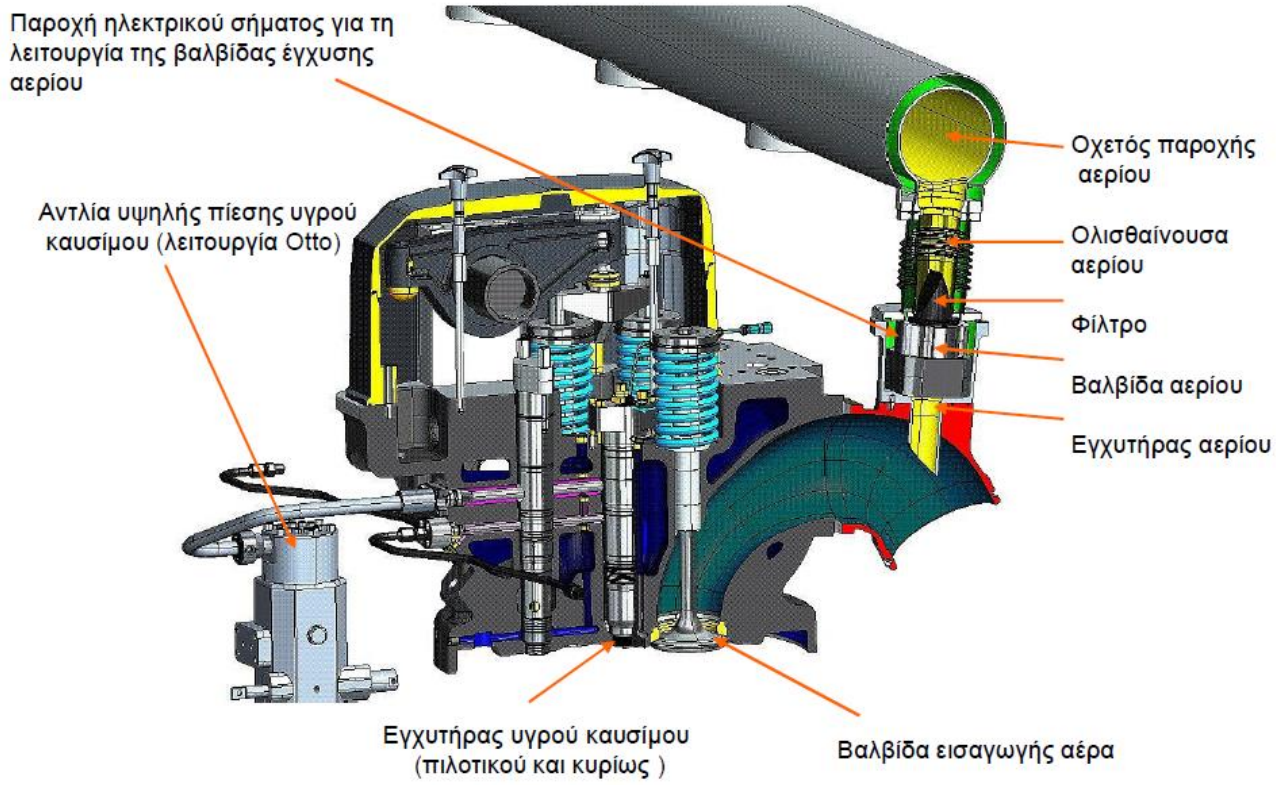


***Εικόνα 29**: Τομές κινητήρα* τύπος 50DF *της* κατασκευάστριας WARTSILA

Στη λειτουργία αερίου, το BOG εγχέεται στην εισαγωγή αέρα πριν από κάθε κύλινδρο ξεχωριστά μέσω μιας ηλεκτρο-βαλβίδας εισαγωγής αερίου, όπου αναμιγνύεται με τον αέρα πλήρωσης πριν εισέλθει στο θάλαμο καύσης. Η διάταξη της βαλβίδας έγχυσης αερίου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 30.

Ο διάταξη επιτρέπει τη συμπίεση και την έγχυση του αερίου (BOG) σε σχετικά χαμηλή πίεση, περίπου 5–6 bar κατά το μέγιστο, μειώνοντας την πολυπλοκότητα του συστήματος τροφοδοσίας αερίου καυσίμου και συνεπώς τους κινδύνους χρήσης μεθανίου υψηλής πίεση στο μηχανοστάσιο. Απαιτείται επίσης μια μικρή ποσότητα (περίπου 1%) υγρού καυσίμου-MDO ως καύσιμο πιλότου όταν λειτουργεί με αέριο, παρέχοντας μια πηγή ανάφλεξης υψηλής ενέργειας για την έναυση του κυρίως καυσίμου στον θάλαμο καύσης.

Στη λειτουργία ντίζελ, ο κινητήρας «DF» λειτουργεί όπως οποιοσδήποτε κινητήρας ντίζελ, χρησιμοποιώντας το παραδοσιακό σύστημα ψεκασμού καυσίμου με αντλία υψηλής πίεσης, μία ανά κύλινδρο μηχανής(jerk pump), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 30, στην οποία μεταξύ άλλων διακρίνονται η κυλινδροκεφαλή καθώς και ο κοινός οχετός παροχής αερίου στους κυλίνδρους της μηχανής.



***Εικόνα 30**: άνω μέρος κινητήρα 50DF της κατασκευάστριας WARTSILA*

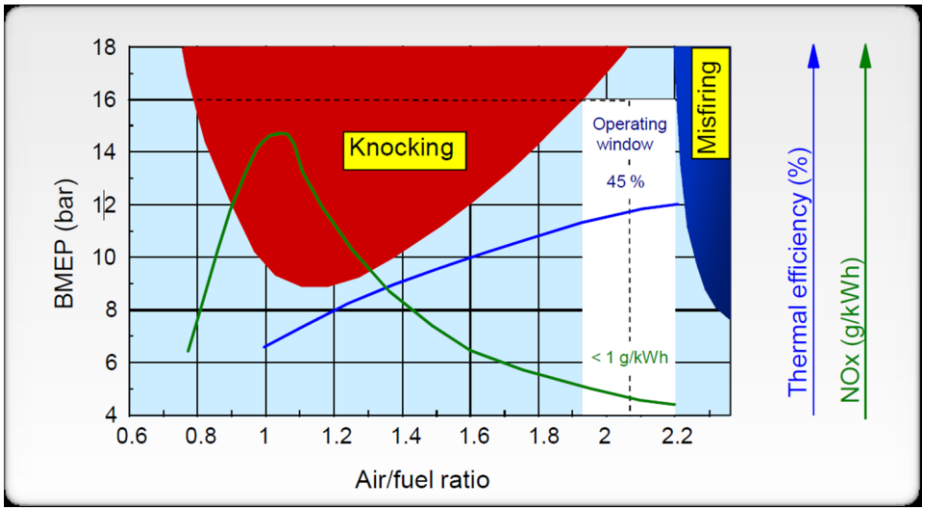
Η εναλλαγή μεταξύ των δύο αρχών/»καυσίμων» πραγματοποιείται με επιλογή του χρήστη , διατηρώντας απρόσκοπτη την παροχή ενέργειας, γεγονός που εξασφαλίζει τη σταθερή λειτουργία των μηχανημάτων/καταναλωτών επί του πλοίου . Η κατανάλωση αερίου και αυτή του ντίζελ ακολουθούν διαφορετικές λειτουργικές αρχές, και ως εκ τούτου έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας. Η λειτουργία Diesel αποδίδει καλύτερα ως προς τη θερμική απόδοση και τη δυναμική απόκριση, ενώ η λειτουργία αερίου έχει πλεονεκτήματα όσον αφορά το κόστος καυσίμου την καθαρότητα του κινητήρα και τις εκπομπές καυσαερίων.

Το σύστημα ελέγχου καύσης αποτελεί πολύ σημαντικότερο μέρος στους κινητήρες διπλού καυσίμου μια και καθορίζει τη συμπεριφορά και απόδοσή του , τόσο κατά τη σταθερή λειτουργία στο επιλεγμένο καύσιμο αλλά και στις μεταβατικές «περιοχές» εναλλαγής μεταξύ των καυσίμων, οι οποίες μπορεί να συνδυάζονται και από ταυτόχρονη μεταβολή της ζήτησης ισχύος από τον κινητήρα.

Η σημασία του συστήματος ελέγχου κινητήρων διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης γίνεται εύκολά αντιληπτή από την εξέταση του διαγράμματος λειτουργίας ενός τέτοιου κινητήρα. Στην εικόνα 31 απεικονίζεται το εν λόγω διάγραμμα, στο οποίο απεικονίζεται μεταξύ άλλων και το επιτρεπόμενο «παράθυρο λειτουργίας» κινητήρα διπλού καυσίμου «φτωχού» μίγματος, κατά τη λειτουργία με αέριο. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, για να λειτουργεί ο κινητήρας με ασφάλεια και την υψηλότερη δυνατή απόδοση, θα πρέπει η σχέση αέρα -καυσίμου να είναι κοντά στο 2.1 ειδικά κατά τη διάρκεια «αυξημένης» ζήτησης ισχύος, δηλαδή κινούμενοι σε υψηλότερες τιμές της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης (BMEP). Μείωση της σχέσης αέρα καυσίμου οδηγεί σε λειτουργία «κρουστικής» καύσης, εντός δηλαδή της κόκκινης περιοχής, ενώ αντίθετα αύξηση της σχέσης αέρα καυσίμου οδηγεί σε καύση με διαλείψεις εντός δηλαδή της μπλε περιοχής. Παρατηρείται επίσης ότι όσος αυξάνει η ζητούμενης ισχύος από τον κινητήρα (αύξηση της μέσης ενδεικνύμενης πίεσης) τόσο στενότερο γίνεται το επιτρεπόμενο παράθυρο λειτουργίας μια και οι περιοχές κρουστικής

καύσης και καύσης με διαλείψεις, συγκλίνουν σημαντικά. Επιπλέον λειτουργία εντός του επιτρεπτού παράθυρου λειτουργίας εξασφαλίζει μεγαλύτερη θερμική απόδοση καθώς και χαμηλότερους ρύπους αζώτου (NOx).

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι για να παραμείνει ο κινητήρας εντός του παραθύρου λειτουργίας και να έχει τη βέλτιστη απόδοση από όλους τους κυλίνδρους, αναφορικά με την ασφάλεια, την απόδοση και εκπομπές ρύπων σε όλες τις συνθήκες, απαιτείται ένα σύστημα δυναμικού ελέγχου και ρύθμισης της διαδικασίας καύσης για κάθε κύλινδρο ξεχωριστά και με τη μέγιστη ακρίβεια.



***Εικόνα 31**: διάγραμμα λειτουργίας κινητήρα διπλού καυσίμου, «φτωχού» μίγματος*

Οι μεγαλύτεροι διαθέσιμοι κινητήρες διπλού καυσίμου μπορούν να παράγουν ισχύς μεταξύ 950–1000 kW ανά κύλινδρο, με διάταξη κυλίνδρων σε σειρά από 6–9 κυλίνδρους ή τύπου V με 12–18 κυλίνδρους. Ο αριθμός των κινητήρων και η επιλογή του αριθμού των κυλίνδρων (=συνολική ισχύς του κάθε κινητήρα) επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη (= «μέγιστη») φόρτιση των κινητήρων , για την παροχή των ενεργειακών αναγκών κατά τις διάφορες λειτουργικές συνθήκες του πλοίου. Με τη διάταξη πολλαπλών κινητήρων, η ηλεκτροπρόωση με κινητήρες διπλού καυσίμου (DFDE) παρέχει ανώτερη συνολική απόδοση εξασφαλίζοντας την ασφάλεια και την εφεδρεία του συστήματος.

Εάν υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο αέριο από την εξαέρωση του φορτίου σε σχέση με την ισχύ που απαιτείται για την πρόωση και άλλους ηλεκτρικούς καταναλωτές, τότε η περίσσεια του BOG αποστέλλεται στη μονάδα καύσης αερίου (GCU, Gas Combustion Unit). Η εγκατεστημένη χωρητικότητα της μονάδας GCU, διαστασιολογείται έτσι ώστε να μπορεί να χειριστεί τη συνολική ποσότητα του αερίου που εξαερώνεται BOG σε ένα τυπικό «έμφορτο» ταξίδι.

Δεδομένου ότι η ζήτηση ισχύος για πρόωση με αυτό της διαχείρισης του φορτίου η οποίο αποτελεί την άλλη μεγάλη ενεργοβόρα λειτουργία του πλοίου , λαμβάνουν χώρα σε διαφορετική χρονική φάση λειτουργίας, το σύστημα της ηλεκτροπρόωσης πλεονεκτεί σημαντικά σε σύγκριση με άλλα μηχανικά συστήματα πρόωσης καθώς απαιτεί σημαντικά μειωμένη εγκατεστημένη ισχύ. Το μειονέκτημα αυτού του συστήματος πρόωσης είναι το υψηλό κόστος της επένδυσης καθώς και το κόστος συντήρησης που σχετίζεται με τους κινητήρες διπλού καυσίμου ενώ είναι αυξημένη και η ποσότητα εξοπλισμού που περιλαμβάνεται στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης.

2.3.3 ΑΡΓΟΣΤΡΟΦΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Από το 2002 έως το 2012 , η διάταξη της ηλεκτροπρόωσης με 4χρονους κινητήρες διπλού καυσίμου, αποτελούσε την επικρατούσα επιλογή για την πλειοψηφία των νέων πλοίων

μεταφοράς ΥΦΑ. Κατά τις αρχές του 2013 , οι 2-χρονοι αργόστροφοι κινητήρες διπλού καυσίμου έλαβαν την πρώτη παραγγελία για ένα ζευγάρι μηχανών σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containers) με αέριο καύσιμο σηματοδοτώντας την αρχή της εποχής του δίχρονου κινητήρα διπλού καυσίμου.

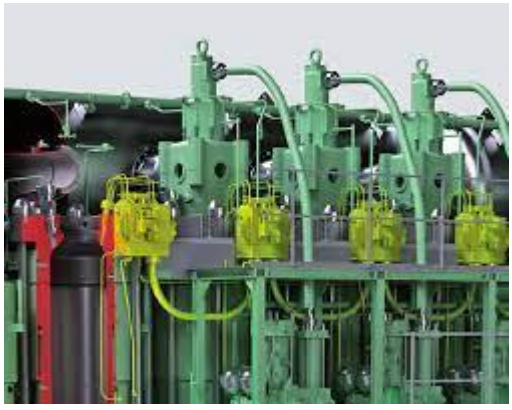
Οι 2-χρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα απόδοσης τόσο σε σχέση με το σύστημα ηλεκτροπρόωσης «DFDE» όσο και με αυτό των ατμοστροβίλων, γεγονός που τους έχει καταστήσει ως την επικρατούσα επιλογή και στα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ τα τελευταία έτη. Διακριτές τεχνικές επιλογές έχουν υιοθετηθεί από τους δύο βασικούς κατασκευαστές 2-χρονων μηχανών. Η MAN Diesel & Turbo χρησιμοποιεί την ιδέα της υψηλής πίεσης ενώ η WinGD εστιάζει στην έννοια της χαμηλής πίεσης.

2.2.3.1. Κινητήρες Υψηλής πίεσης αερίου- MAN Diesel & Turbo

Οι κινητήρες αερίου υψηλής πίεσης ME-GI -βλ. εικόνα 32- λειτουργούν στον κύκλο ντίζελ. Το BOG συμπιέζεται μέσω του συστήματος τροφοδοσίας αερίου καυσίμου (Fuel Gas Supply System FGSS), και στη συνέχεια ψεκάζεται απευθείας σε υψηλή πίεση (250–300 bar) στον κύλινδρο μετά την ανάφλεξη του «πιλοτικού» καυσίμου ντίζελ κοντά στο άνω νεκρό σημείο.

Υποστηρίζεται ότι αυτή η αρχή λειτουργίας έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη διεργασία καύσης αερίου με κύκλο Otto όπου συμβαίνει ανάμιξη του αέρα με το αέριο, μια και εξαλείφει τον κίνδυνο κρουστικής καύσης και παρέχει τη δυνατότητα «πλήρους» κι ελεγχόμενης καύσης αερίου ανεξάρτητα από τον αριθμό μεθανίου, λόγω του γεγονότος ότι το αέριο καύσιμο δεν εμπλέκεται στη διαδρομή/φάση της συμπίεσης.

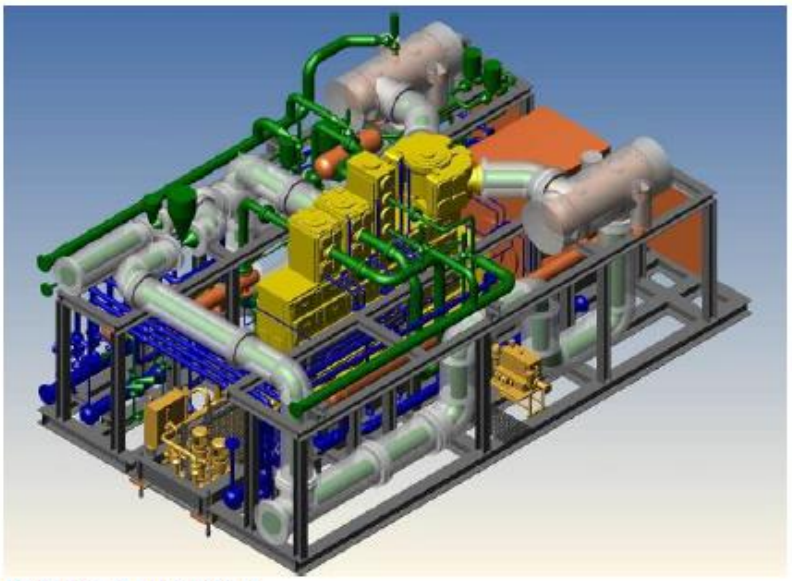




Εικόνα 32: κινητήρας αερίου υψηλής πίεσης ME-GI

Αυτή η επιλογή καθιστά δυνατή τη χρήση σχεδιαστικών επιλογών κινητήρων υψηλότερης σχέσης συμπίεσης, προσφέροντας έτσι μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση. Για πλοία μεταφοράς ΥΦΑ χωρητικότητας 174.000 m3 ή μεγαλύτερης, η λύση με δύο κινητήρες ME-GI είναι η πιο ελκυστική επιλογή, παρέχοντας και την απαιτούμενη εφεδρεία όσον αφορά την πρόωση.

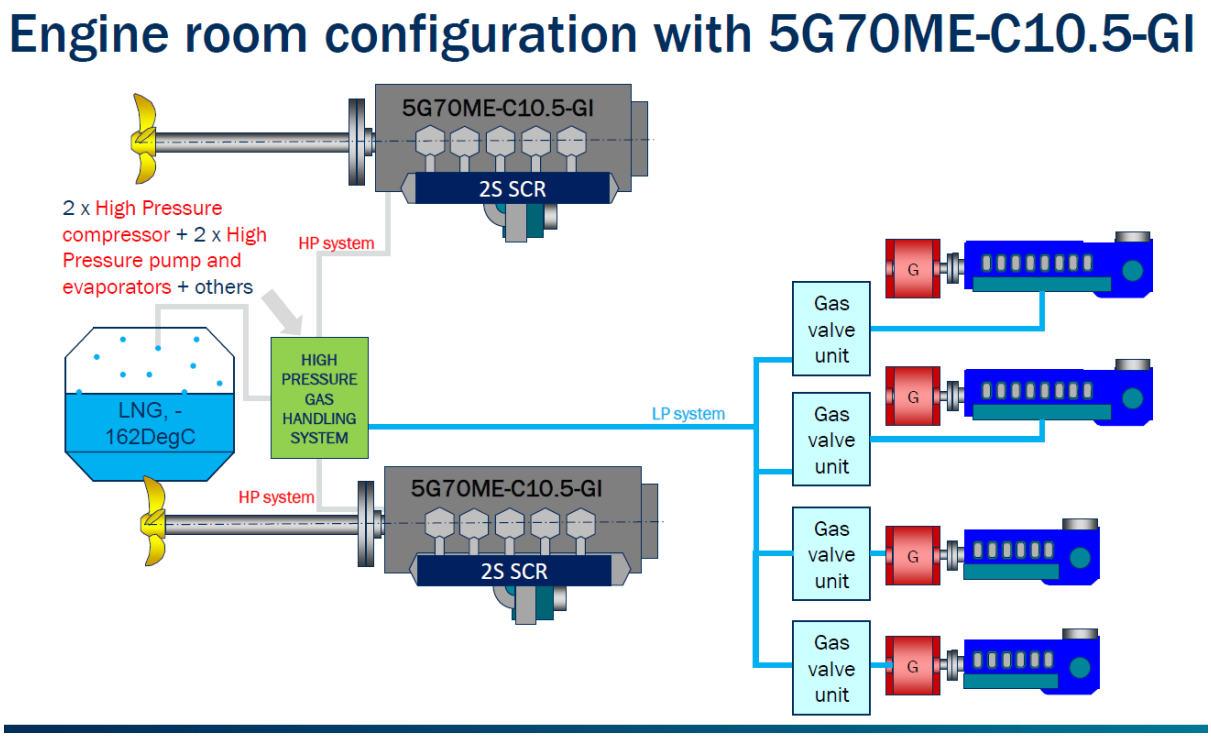
Το σύστημα παροχής αερίου (FGSS) υψηλής πίεσης για κινητήρες ME-GI έχει δύο βασικές διατάξεις. Η πρώτη αποτελείται από ένα σύστημα όπου ένας εμβολοφόρος, συμπιεστής -βλ. εικόνα 33- τροφοδοτεί τη μηχανή ME-GI με αέριο καύσιμο υψηλής πίεσης, ενώ η άλλη όπου μια αντλία ΥΦΑ και ένας αεριοποιητής τροφοδοτούν τον κινητήρα ME-GI με αέριο υψηλής πίεσης . Επιπλέον υπάρχει και μια συνδυαστική επιλογή που αποτελείται από τον συμπιεστή και τη λύση της αντλίας ΥΦΑ. Για την αντιμετώπιση της πλεονάζουσας ποσότητας αερίου εξαέρωσης σε σχέση με τη ζήτηση των κινητήρων, μπορεί να εγκατασταθεί επί του πλοίου, σύστημα μερικής ή και ολικής επανα-υγροποίησης.



Εικόνα 33*: εμβολοφόρος συμπιεστής αερίου υψηλής πίεσης κατασκευαστή BURCKHARDT*

Στην εικόνα 34 φαίνονται τα κύρια στοιχεία μιας διάταξης πρόωσης με κινητήρες ME-GI. Η διάταξη αποτελείται από το σύστημα παροχής αερίου, από τις δεξαμενές φορτίου προς τους συμπιεστές υψηλής πίεσης, κι από εκεί προς τις 2 κύριες μηχανές ME-GI, οι οποίες κινούν δύο (2) έλικες σταθερού βήματος σε μεταβλητό αριθμό στροφών, ανάλογα με της επιθυμητή ταχύτητα του πλοίου.

Ένα άλλο δίκτυο μεταφέρει αέριο χαμηλής πίεσης προς τις ηλεκτρομηχανές του πλοίου -συνήθως 4- οι οποίες λειτουργούν σε κύκλο otto, με παρόμοια χαρακτηριστικά αυτών που χρησιμοποιούνται κι έχουν αναφερθεί στη διάταξη της ηλεκτροπρόωσης.



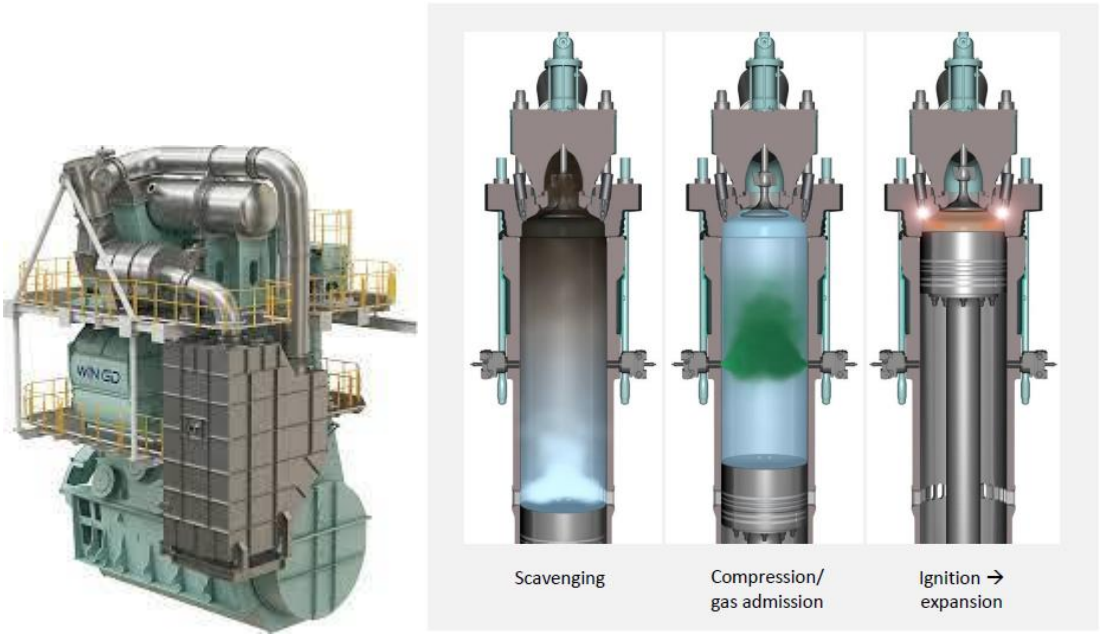
Εικόνα 34*:* διάταξης πρόωσης με κινητήρες ME-GI.

Το αέριο υψηλής πίεσης τροφοδοτείται από το σύστημα παροχής αερίου(FGSS) στο μηχανοστάσιο μέσω συστήματος σωληνώσεων διπλού τοιχώματος, όπου το αέριο καύσιμο κυκλοφορεί στον εσωτερικό σωλήνα ενώ πρέπει να υπάρχει χώρος μεταξύ της σωλήνωσης του αερίου καυσίμου και του εξωτερικού τοιχώματος του σωλήνα ο οποίος να είναι εξοπλισμένος με μηχανικό εξαερισμό υποπίεσης . Η συγκεκριμένη διάταξη διασφαλίζει ότι το μηχανοστάσιο θεωρείται ως ένα κοινό μηχανοστάσιο πλοίου, παρά ως μια επικίνδυνη περιοχή και συμμορφώνεται έτσι με την απαίτηση για «χώρους μηχανημάτων εγγενώς ασφαλείς για αέρια» που καθορίζονται στον κώδικα IGF (International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels) του IMO.

Όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων, οι δίχρονοι κινητήρες υψηλής πίεσης μειώνουν τις εκπομπές NOx κατά 40% κατά τη λειτουργία με αέριο, σε σύγκριση με τη χρήση βαρέως καυσίμου HFO χωρίς επεξεργασία καυσαερίων, που πληροί τα όρια IMO Tier II NOx. Για να επιτευχθούν τα όρια Tier III, ο κινητήρας ME-GI απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό, συνήθως σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων (exhaust gas recirculation, EGR) ή καταλύτη (Selective catalytic Reduction, SCR). Επιπλέον, οι εκπομπές CO2 μειώνονται κατά περίπου 24% ,ενώ οι εκπομπές μεθανίου κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

2.3.3.2 Κινητήρες Χαμηλής πίεσης αερίου- WINGD

Η τεχνολογία χαμηλής πίεσης WINGD, X-DF -βλ. εικόνα 35- βασίζεται στον κύκλο Otto με «φτωχό» μίγμα , στον οποίο το καύσιμο και ο αέρας προ-αναμιγνύονται και καίγονται με σχετικά υψηλή αναλογία αέρα προς καύσιμο. Η εισαγωγή αερίου στον κύλινδρο λαμβάνει χώρα όταν το έμβολο βρίσκεται περίπου στο μέσο της διαδρομής της φάσης συμπίεσης και επομένως η πίεση στο θάλαμο καύσης είναι χαμηλή. Αυτό επιτρέπει την έγχυση του αερίου σε χαμηλή πίεση, που κυμαίνεται από 5 έως 16 bar. Με την έγχυση αερίου χαμηλής πίεσης, τα μείγματα αερίου-αέρα χρειάζονται μια πηγή ανάφλεξης για την έναρξη της καύσης. Η πιο κοινή μέθοδος ανάφλεξης είναι η χρήση πιλοτικού ψεκασμού καυσίμου, με την -πολύ μικρή- ποσότητα καυσίμου να αναλογεί στο 0,5% του συνολικά ψεκασμένου καυσίμου.

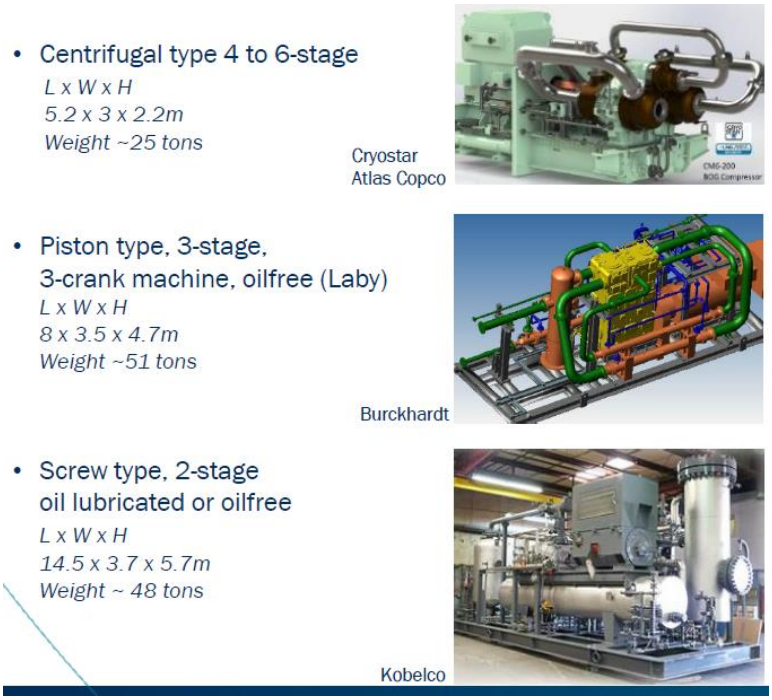


Εικόνα 35: κινητήρες WINGD, XDF.

Η ιδέα της χαμηλής πίεσης προσφέρει τη δυνατότητα εφαρμογής ενός απλού συστήματος παροχής αερίου (FGSS), αφού το αέριο καύσιμο αναμιγνύεται με τον αέρα πλήρωσης στη μέση περίπου της διαδρομής του εμβόλου, ενώ η πίεση έγχυσης που απαιτείται είναι κάτω από 16 bar σε οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας.

Υποστηρίζεται ότι το σύστημα παροχής αερίου είναι σχετικά απλό και αξιόπιστο. Επιπλέον, σύστημα παροχής αερίου χαμηλής πίεσης σημαίνει ευρύτερη επιλογή προμηθευτών τέτοιων συστημάτων και κατανάλωση σημαντικά χαμηλότερης ενέργειας συμπίεσης του αερίου, μειώνοντας έτσι το τόσο το κόστος επένδυσης όσο και τα λειτουργικά κόστη.

Στην εικόνα 36 φαίνονται διάφοροι τύποι συμπιεστών αερίου χαμηλής πίεσης διαφόρων κατασκευαστών. Παρατηρείται η εφαρμογή διαφορετικών τύπων και τεχνολογιών δηλαδή συμπιεστές ,φυγοκεντρικού τύπου, εμβολοφόροι καθώς και κοχλιοφόροι, σε αντίθεση με του ς συμπιεστές υψηλής πίεσης όπου οι επιλογές είναι σχετικά περιορισμένες ,γεγονός που επιδρά τόσο στο κόστος αλλά και στην αξιοπιστία των αντίστοιχων μηχανημάτων.



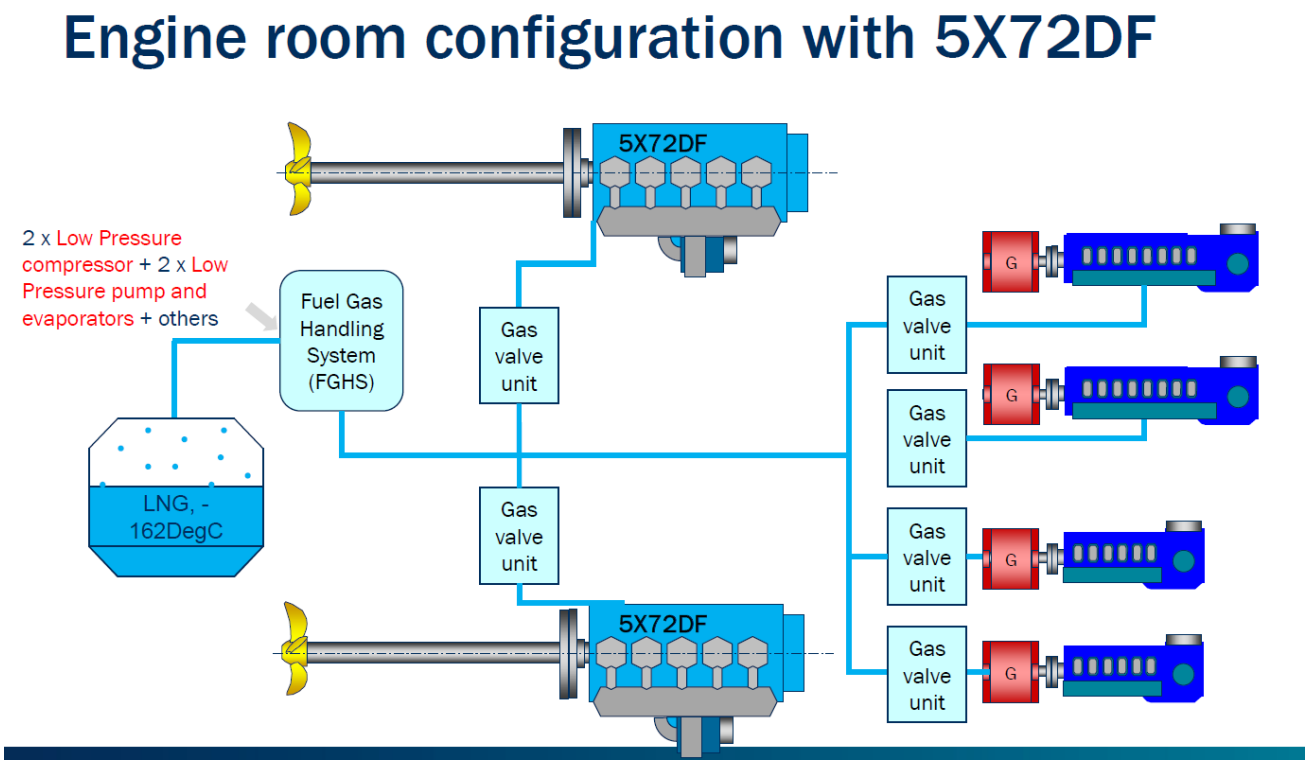
Εικόνα 36: Τύποι συμπιεστών αερίου χαμηλής πίεσης, διαφόρων κατασκευαστών

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του κινητήρα X-DF χαμηλής πίεσης είναι το χαμηλό επίπεδο των εκπομπών οποιουδήποτε στοιχείου/συστατικού των καυσαερίων. Καθώς ο κινητήρας X-DF χαμηλής πίεσης έχει προ-αναμεμιγμένο ομοιογενές φτωχό μείγμα αερίου και αέρα στο θάλαμο καύσης, οι θερμοκρασίες της φλόγας είναι σχετικά χαμηλές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλά επίπεδα παραγωγής NOx , τα οποία ακόμη και χωρίς τη χρήση κάποιου συστήματος επεξεργασίας, να κυμαίνονται περίπου στο 50% των ορίων IMO Tier III.
Επιπλέον, ο σταθμισμένος μέσος όρος της σχετικής εκπομπής μεθανίου ήταν περίπου 3 g/kWh, ενώ με την εισαγωγή συστημάτων ανα-κυκλοφορίας καυσαερίων το επίπεδο διαφυγής μεθανίου έχει μειωθεί δραστικά .

Στην εικόνα 37 φαίνονται τα κύρια στοιχεία μιας διάταξης πρόωσης με κινητήρες χαμηλής πίεσης XDF. Η διάταξη αποτελείται από το σύστημα παροχής αερίου, το οποίο μεταφέρει το αέριο από τις δεξαμενές φορτίου προς τους συμπιεστές χαμηλής πίεσης, κι από

εκεί προς τις 2 κύριες μηχανές XDF, οι οποίες κινούν δύο (2) έλικες σταθερού βήματος σε μεταβλητό αριθμό στροφών, ανάλογα με της επιθυμητή ταχύτητα του πλοίου.

Όπως και στην περίπτωση των 2-χρονων μηχανών υψηλής πίεσης, η διάταξη περιλαμβάνει και τις ηλεκτρομηχανές του πλοίου -συνήθως 4- οι οποίες λειτουργούν όπως και οι Κύριες μηχανές χαμηλής πίεσης σε κύκλο otto.



Εικόνα 37: διάταξης πρόωσης με κινητήρες WinGD X-DF.

2.3.3.3 Σύγκριση των δύο τεχνολογικών επιλογών

Δεδομένου ότι οι δύο κατασκευαστές WinGD X-DF και MAN ME-GI χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες και τεχνικές επιλογές , κάθε επιλογή έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση ισχύος, τις εκπομπές αερίων ρύπων και την οικονομική λειτουργία της εγκατάστασης , σύμφωνα με τα στοιχεία που παρέχονται στον Πίνακα της εικόνας 38. Οι κινητήρες χαμηλής πίεσης έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα όσον αφορά τις εκπομπές NOx, τα συστήματα παροχής καυσίμου αερίου και το κόστος της επένδυσης , ενώ οι κινητήρες υψηλής πίεσης υπερτερούν από άποψη θερμικής ισχύος, συμβατότητα/ποιότητα αερίου καθώς και διαφυγή μεθανίου στην ατμόσφαιρα (methane slip).

Επιπλέον οι κινητήρες υψηλής πίεσης προσφέρουν χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου αλλά απαιτούν ενεργοβόρα βοηθητικά συστήματα για την επίτευξη της αναγκαίας υψηλής πίεσης, γεγονός που επιδρά αρνητικά στη συνολική απόδοση του εγκατεστημένου συστήματος πρόωσης. Οι κινητήρες χαμηλής πίεσης προσφέρουν απλούστερους σχεδιασμούς με σχετικά χαμηλότερο κόστος επένδυσης. Διατίθενται επίσης μικρότεροι τετράχρονοι κινητήρες, τύπου διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης, καθώς και αμιγώς αερίου όπου η ανάφλεξη του καυσίμου πραγματοποιείται με σπινθηριστή (μπουζί). Ο σχεδιασμός του κινητήρα ΥΦΑ βελτιώνεται σταθερά καθώς η τεχνολογία υιοθετείται ευρύτερα, με αυξήσεις στην απόδοση και μειώσεις στις εκπομπές διαφυγόντος μεθανίου (methane slip).

	Χαμηλή πίεση (WinGD X-DF)	**Υψηλή πίεση (MAN ME-GI)**
Ισχύς -Απόδοση	• BMEP: 17,3 bar • περίπου 17% χαμηλότερη από τον αντίστοιχο κινητήρα Diesel • Δυναμική απόκριση: φτωχότερη από τον κινητήρα Diesel	• BMEP 21 bar • συγκρίσιμη με τον αντίστοιχο κινητήρα ντίζελ • Δυναμική απόκριση: συγκρίσιμη με κινητήρα Diesel
Θερμική απόδοση	Περίπου 47%	Περίπου 50%
Εκπομπές NOx	IMO Tier III	IMO Tier II
CH4 slip	3 g/kWh	0,2 g/kWh
Αριθμός Μεθανίου (MN)	MN ≥ 65 (τεχνολογία DCC, Dynamic Combustion control)	«Προσαρμογή» σε διάφορα MN
κατανάλωση Αέριο	140–142 g/kWh @100%MCR	136–138 g/kWh @100%MCR
Πιλοτικό καύσιμο κατανάλωση	• 0,8 g/kWh@100%MCR • 2,7 g/kWh@30%MCR	• 5 g/kWh@100%MCR • 12 g/kWh@30%MCR
Σύστημα παροχής καυσίμου αερίου	• Αντλία ΥΦΑ: φυγοκεντρική αντλία, με απλή δομή και χαμηλή απαίτηση συντήρησης • Συμπιεστής αερίου χαμηλής πίεσης: μεγάλη ποικιλία των προϊόντων, μικρό μέγεθος και βάρος, χαμηλή ενέργεια κατανάλωση	• Ατμοποιητής χαμηλής πίεσης: χαμηλό κόστος και ώριμη τεχνολογία • Συμπιεστής αερίου υψηλής πίεσης: λίγα διαθέσιμα προϊόντα, μεγάλο μέγεθος και μεγάλο βάρος, υψηλή ενέργεια κατανάλωσης, πολύ υψηλό κόστος συντήρησης
CAPEX	• Για πλοία με καύσιμο ΥΦΑ, το CAPEX του συστήματος παροχής καυσίμου και αερίου υψηλής πίεσης είναι περίπου 15% υψηλότερο • Για μεταφορείς ΥΦΑ, το CAPEX του συστήματος παροχής καυσίμου και αερίου υψηλής πίεσης είναι περίπου 40% υψηλότερο.	
OPEX	Οι δύο επιλογές είναι συγκρίσιμες	

Εικόνα 38: *συγκριτικός πίνακας κινητήρων* WinGD X-DF, με κινητήρες *ME-GI*

3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ/ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΦΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΥΠΑΡΧΟΝΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ- ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΤΗΝ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ

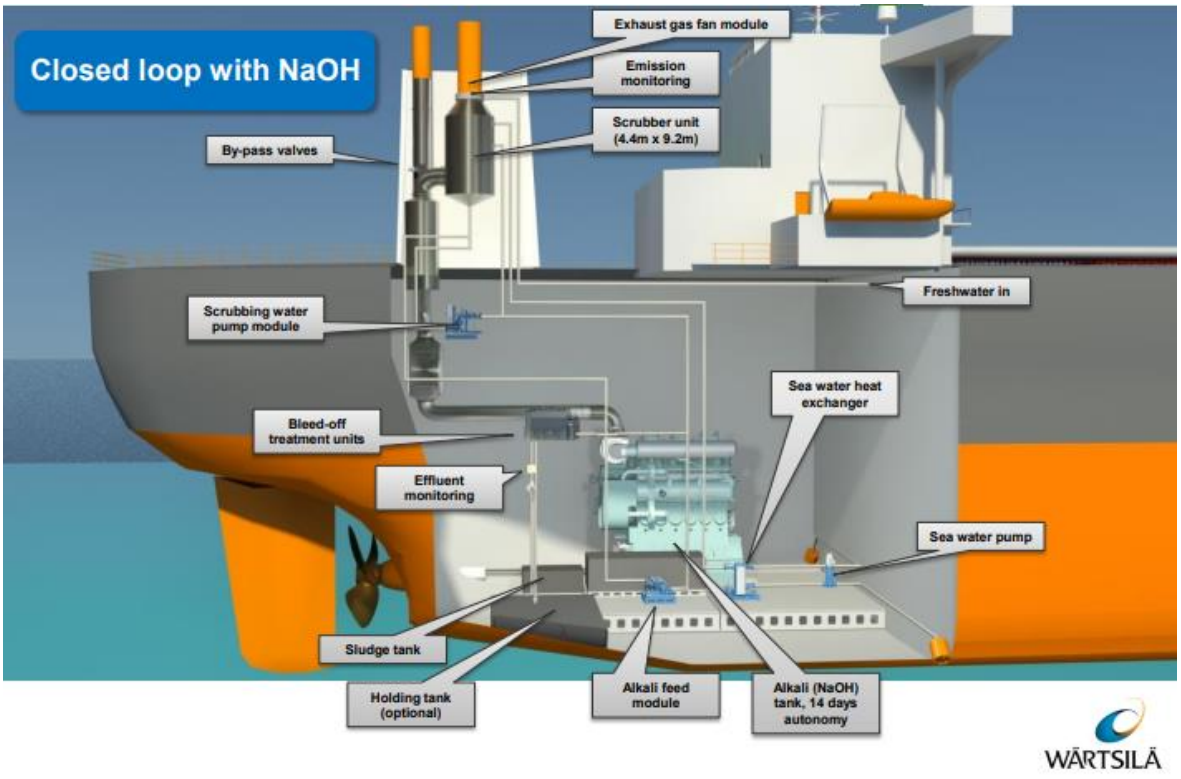
Όπως είναι γνωστό, η ναυτιλία αποτελεί τον πιο αποδοτικό τρόπο μεταφορών, και από τη θεώρηση της μείωσης των εκπομπών του άνθρακα, σε μεταφορικό έργο εκφραζόμενο σε μετρικούς τόνους/ανά χιλιόμετρο (mtn/km), είναι δε 25 φορές πιο αποδοτική σε σχέση με τις αερομεταφορές. Ο όγκος των μεταφορών από το διεθνές θαλάσσιο εμπόριο αυξάνεται σταθερά, από περίπου 8 δισεκατομμύρια τόνους το 2007 σε περίπου 10,7 δισεκατομμύρια τόνους το 2021 (25,2%).

Ο παγκόσμιος ναυτικός στόλος αριθμεί περί τα 60.000 πλοία, τα οποία έχουν μια προβλεπόμενη διάρκεια ζωής της τάξης των 25 ετών. Λόγω της συνεχούς αύξησης της θαλάσσιας εμπορικής δραστηριότητας, η ναυτιλία και η ναυπηγική βιομηχανία αντιμετωπίζουν νέες προκλήσεις, εξαιτίας και της αυστηροποίησης των κανονισμών για τις εκπομπές αερίων ρύπων από τον IMO, αναζητώντας νέες τεχνολογίες και εξοπλισμό για την εναρμόνισή τους.

Το πλαίσιο για τη συμμόρφωση με τους νέους κανονισμούς διαμορφώνεται και επικεντρώνεται σε τέσσερις βασικές τεχνο-οικονομικές επιλογές, που σχετίζονται με τη χρήση υπαρχόντων καυσίμων τα οποία προέρχονται από την απόσταξη του αργού πετρελαίου:

- Η πρώτη είναι η χρήση μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, <1% κ.β. (LSFO-Low Sulphur Heavy Fuel Oil). Η μετάβαση σε LSFO είναι το απλούστερο μέτρο επειδή τα υπάρχοντα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς την ανάγκη πρόσθετων εγκαταστάσεων, επομένως η εφαρμογή της λύσης αυτής δεν απαιτεί ιδιαίτερες επενδύσεις . Ωστόσο, οι τιμές LSFO είναι περισσότερο από 30% υψηλότερες από το μαζούτ (HFO), γεγονός που θ' αυξήσει τα λειτουργικά έξοδα των πλοίων. Επιπλέον, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν αρκετά διυλιστήρια για την παραγωγή LSFO, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο κίνδυνος αύξησης των τιμών λόγω έλλειψης εφοδιασμού.
- Η δεύτερη είναι η εγκατάσταση ειδικού εξοπλισμού «πλύσης» των καυσαερίων (scrubber) για την αφαίρεση οξειδίων του θείου SOx , κατά τη χρήση μαζούτ υψηλού θείου (HFO). Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα της δυνατότητας χρήσης HFO, αλλά το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι σχετικά υψηλό. Η σχέση της τρέχουσας τιμής του βαρέως καυσίμου σε σχέση με το μαζούτ χαμηλού θείου, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα αξιολόγησης της βιωσιμότητας της επένδυσης. Έτσι σημαντική διαφορά τιμής των δύο τύπων καυσίμου, καθιστά οικονομικά συμφέρουσα την εγκατάσταση εξοπλισμού πλύσης καυσαερίων, οδηγώντας σε ρεαλιστικό και αποδεκτό χρόνο απόσβεσης. Υπάρχουν 3 διατάξειςς «πλύσης» καυσαερίων:
    - Σύστημα ανοιχτού βρόγχου (open loop scrubber), στο οποίο το μέσο πλύσης είναι θαλασσινό νερό, το οποίο μετά την πλύση αποβάλλεται πίσω στη θάλασσα
    - Σύστημα κλειστού βρόγχου (closed loop scrubber) -βλέπε εικόνα 39- στο οποίο το μέσο πλύσης είναι γλυκό νερό, το οποίο μετά την πλύση ανακυκλώνεται αφού ουδετεροποιηθεί με τη χρήση χημικών
    - Υβριδικό σύστημα, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε ως ανοιχτού ή ως κλειστού βρόγχου.

Από τεχνικής άποψη πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την εφαρμογή της λύσης αυτής στην αντίθλιψη που μπορεί να προκύψει στο σύστημα εξαγωγής καυσαερίων των μηχανών, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση του κινητήρα και αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον λόγω των χαρακτηριστικών του συστήματος απαιτείται σχετικά μεγάλος χώρος εγκατάστασης στο πλοίο ενώ είναι δύσκολη η εγκατάσταση σε μικρά πλοία.



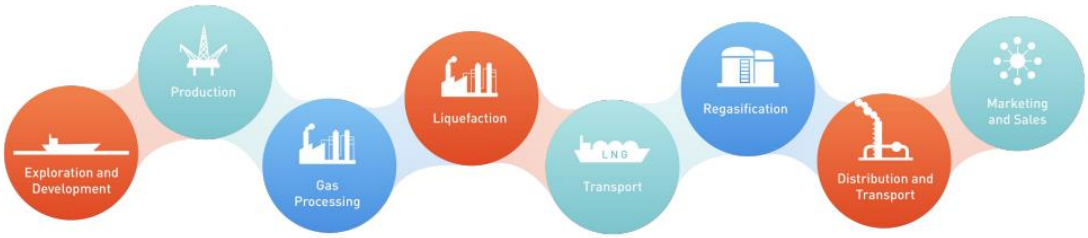
Εικόνα 39: *Εγκατάσταση συστήματος πλύσης καυσαερίων «κλειστού» τύπου*

- Η Τρίτη επιλογή είναι η χρήση πετρελαίου Diesel (MGO) αντί για μαζούτ (HFO). Η λύση αυτή δεν απαιτεί πρόσθετες εγκαταστάσεις, επειδή η διαχείριση MGO μπορεί να γίνει από τα υπάρχοντα συστήματα. Κύριο μειονέκτημα της χρήσης MGO είναι το αυξημένο κόστος αγοράς, ενώ η συνεχής λειτουργία των μηχανών με MGO απαιτεί μικροεπεμβάσεις στις μηχανές (σύστημα τροφοδοσίας και έγχυσης καυσίμου), έτσι ώστε να διατηρηθεί η απόδοσή τους καθώς και η κατανάλωση καυσίμου μια και οι ναυτικοί κινητήρες ως επί τω πλείστων σχεδιάζονται και ρυθμίζονται για λειτουργία με HFO.
- Τέλος, είναι δυνατή η αντικατάσταση του HFO/MGO με υγροποιημένο φυσικό αέριο (ΥΦΑ). Το ΥΦΑ υστερεί ως προς τα υγρά καύσιμα, μεταξύ άλλων λόγω της περιορισμένης σχετικά υποδομής εφοδιασμού και των υψηλών αρχικών επενδύσεων, ωστόσο πληροί τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς του ΙΜΟ επειδή μπορεί να μειώσει σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση τόσο ως προς τους ρύπους άνθρακα αλλά και τους ρύπους αζώτου, ως αποτέλεσμα των μειωμένων θερμοκρασιών αιχμής κατά την καύση.

Και οι τέσσερις τρόποι που προαναφέρθηκαν, έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ωστόσο, το παγκόσμιο ενδιαφέρον για το ΥΦΑ ως καύσιμο της ναυτιλίας, κερδίζει συνεχώς έδαφος έναντι των υγρών καυσίμων.

3.2 ΣΤΑΔΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΥΦΑ

Τα στάδια της διαδικασίας για την παραγωγή και διάθεση του ΥΦΑ είναι τα εξής:



Εξερεύνηση-Ανάπτυξη και Παραγωγή

Η «αξιακή» αλυσίδα ΥΦΑ ξεκινά με τη γεώτρηση και την παραγωγή φυσικού αερίου από υπόγειες φυσικές δεξαμενές αερίου. Η αναπτυξιακή δραστηριότητα κυριαρχείται ιστορικά από τις εθνικές πετρελαϊκές εταιρίες σε συνεργασία με διεθνείς εταιρείες πετρελαίου (IOC) και χαρακτηρίζεται από μεγάλες κεφαλαιακές απαιτήσεις καθώς και την ανάγκη για έμπειρους χειριστές και υψηλές απαιτήσεις τεχνογνωσίας.

Επεξεργασία και Υγροποίηση

Το αέριο που προέρχεται από το πεδίο παραγωγής, -αέριο «τροφοδοσίας»- θα πρέπει να αποσταλεί σε εγκατάσταση επεξεργασίας πριν από την υγροποίηση. Ενώ το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται από τους καταναλωτές είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου μεθάνιο, το φυσικό αέριο μετά την εξόρυξη, αποτελείται από μια ποικιλία διαφόρων ενώσεων και αερίων όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, θείο, υδράργυρος, νερό και άλλες ουσίες. Αφού αφαιρεθούν οι ακαθαρσίες και τα υγρά, το φυσικό αέριο είναι έτοιμο για υγροποίηση. Στη μονάδα υγροποίησης (liquefaction), το φυσικό αέριο ψύχεται σε υγρό σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης, στους -162ºC (-260ºF). Στην υγροποιημένη του μορφή, το ΥΦΑ καταλαμβάνει περίπου το 1/600ο του χώρου της αέριας μορφής (!!!), το οποίο καθιστά πιο αποτελεσματική και συμφέρουσα τη μεταφορά του. Το κόστος κεφαλαίου των μονάδων επεξεργασίας και υγροποίησης είναι συνήθως υψηλό ενώ χρηματοδοτείται κι αξιολογείται σε έναν μακρύ αναπτυξιακό κύκλο πολλών δεκαετιών.

Αποστολή/Μεταφορά

Μόλις το φυσικό αέριο υγροποιηθεί, είναι έτοιμο για μεταφορά μέσω εξειδικευμένων πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ, προς την εγκατάσταση επαναεριοποίησης (regasification). Τα πλοία ΥΦΑ είναι πλοία διπλού κύτους ειδικά σχεδιασμένα για να διατηρούν το φορτίο ΥΦΑ κοντά στους -162ºC.

Τα πλοία ανήκουν συχνά σε ναυτιλιακή εταιρεία και ναυλώνονται σε πωλητή ή αγοραστή του αερίου. Σε ορισμένα πλήρως ολοκληρωμένα έργα, το πλοία ναυπηγούνται και ανήκουν στην κοινοπραξία του έργου. Τα έργα του Κατάρ αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού.

Επαναεριοποίηση και αποθήκευση

Στο στάδιο της επαναεριοποίησης, το ΥΦΑ επιστρέφει στην αρχική του αέρια μορφή με αύξηση της θερμοκρασίας του. Η επαναεριοποίηση λαμβάνει χώρα συνήθως στην ξηρά στον τερματικό σταθμό εισαγωγής που περιλαμβάνει εγκαταστάσεις ελλιμενισμού για τα πλοία μεταφοράς ΥΦΑ, μία ή περισσότερες κρυογενικές δεξαμενές για την αποθήκευση του ΥΦΑ μέχρι την επαναεριοποίησή του καθώς και μονάδα επαναεριοποίησης. Απαιτείται κρυογενική εμπειρογνωμοσύνη για τις εγκαταστάσεις εισαγωγής, ενώ το κόστος κεφαλαίου είναι πολύ χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο της υγροποίησης.

Διανομή και μεταφορά στον τελικό καταναλωτή-Αγορά/Πωλήσεις

Οι βασικές πτυχές αυτών των σταδίων περιλαμβάνουν την ικανότητα να προβλέπεται ο όγκος, η τιμή, και προσφορά/ζήτηση έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η βέλτιστη διαπραγμάτευση μεταξύ των μερών και επίτευξη ικανοποιητικών συμφωνιών μεταφοράς, διανομής και πωλήσεων. Αγοραστές και πωλητές πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις αλλαγές (και την πιθανότητα αλλαγών) τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και συνθήκες της διεθνούς αγοράς.

Το μάρκετινγκ και η εμπορία ΥΦΑ απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό έτσι ώστε να δημιουργούνται έσοδα που να ικανοποιούν όλους τους ενδιαφερόμενους. Επιπλέον η διαχείριση και διάθεση του τελικού προϊόντος θα πρέπει να αποσκοπεί και στην επέκταση της χρήσης η οποία θα υποστηρίζεται από κρατικά κυρίως έργα υποδομής, που απαιτούνται για την παράδοση στους καταναλωτές.

3.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΦΑ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ

Το ΥΦΑ έχει μια σειρά από λόγους για την υπεροχή του έναντι των άλλων συμβατικών ορυκτών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του ότι είναι μη τοξικό, μη διαβρωτικό και άοσμο. Επίσης, ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του ΥΦΑ είναι ότι σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα, δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων για την κάλυψη των απαιτήσεων των «ζωνών» ελέγχου εκπομπής αερίων ρύπων (ECA, emission control area). Τα άφθονα αποθέματα και οι σχετικά χαμηλές τιμές του ΥΦΑ είναι ανταγωνιστικά στη διεθνή αγορά ενέργειας. Οι τιμές του ΥΦΑ αναμένεται να είναι χαμηλότερες στο μέλλον καθώς είναι διαθέσιμο περισσότερο φυσικό αέριο λόγω της ανάπτυξης των πόρων φυσικού αερίου στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και αλλού. Τέλος η τεχνολογία αποθήκευσης , διαχείρισης και καύσης τελικά του ΥΦΑ σε ναυτικές εφαρμογές είναι τεχνολογικά ώριμη και αποδοτική ενώ παρέχει τη βάση για τη δοκιμή και εξέλιξη άλλων καυσίμων, τα οποία πιθανά να χρησιμοποιηθούν με σκοπό την περαιτέρω βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ναυτιλίας.

Η αξιολόγηση της θετικής επίδρασης του ΥΦΑ ως καύσιμο στις ναυτικές εφαρμογές, θα αναπτυχθεί στους παρακάτω τομείς:

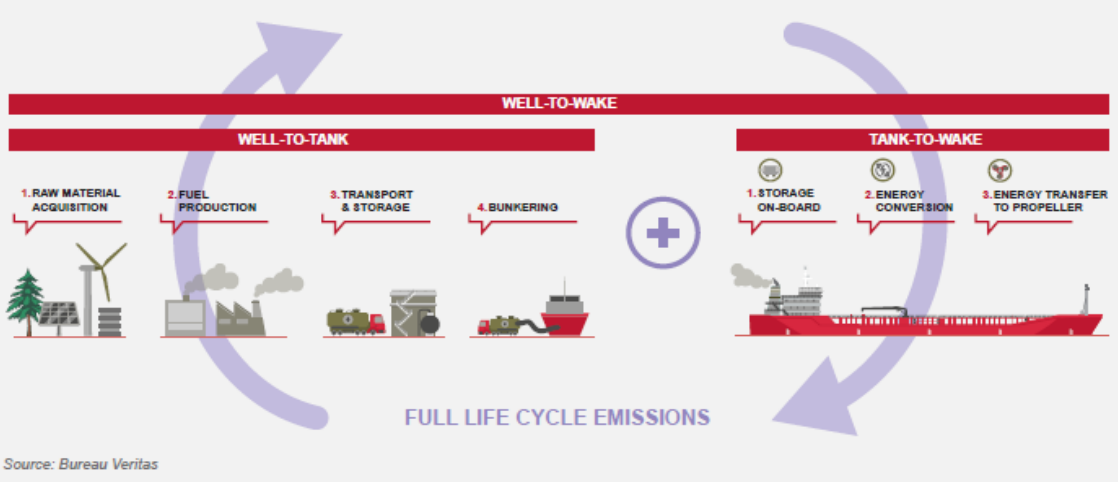
3.3.1 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

3.3.2 Οικονομική επίδραση

3.3.3 Εφαρμογή της τεχνολογίας στην πράξη

Η όλη διαδικασία της παραγωγής ενός καυσίμου είναι υψίστης σημασίας για την κατανόηση της επίδρασής της στην παραγωγή CO2 από το σημείο εξόρυξης μέχρι την παραγωγή της απαιτούμενης ισχύος για την κίνηση του πλοίου ***(well-to-wake)***. Έτσι ενώ κάποια εναλλακτικά καύσιμα μπορεί να εκλύουν χαμηλότερους ρύπους CO2 κατά την καύση τους, η όλη διαδικασία παραγωγής τους, αν δε στηρίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δύναται να οδηγεί σε μεγαλύτερη συνολικά παραγωγή αερίων ρύπων κι άρα τελικά σε μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Προς χάριν αντικειμενικότερης αξιολόγησης του ΥΦΑ ως καύσιμο, αλλά και των υπολοίπων καυσίμων, παρατίθεται παρακάτω η «αξιακή αλυσίδα» παραγωγής και διάθεσης του ΥΦΑ από το σημείο εξόρυξης μέχρι τη χρήση/καύση του. Τα 2 επιμέρους στάδια της αξιολόγησης -βλέπε εικόνα 40- του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενός καυσίμου το οποία συνιστούν τη συνολική εικόνα (η οποία καλείται ως ***«Well-To-Weak»)*** των εκπεμπόμενων ρύπων είναι :

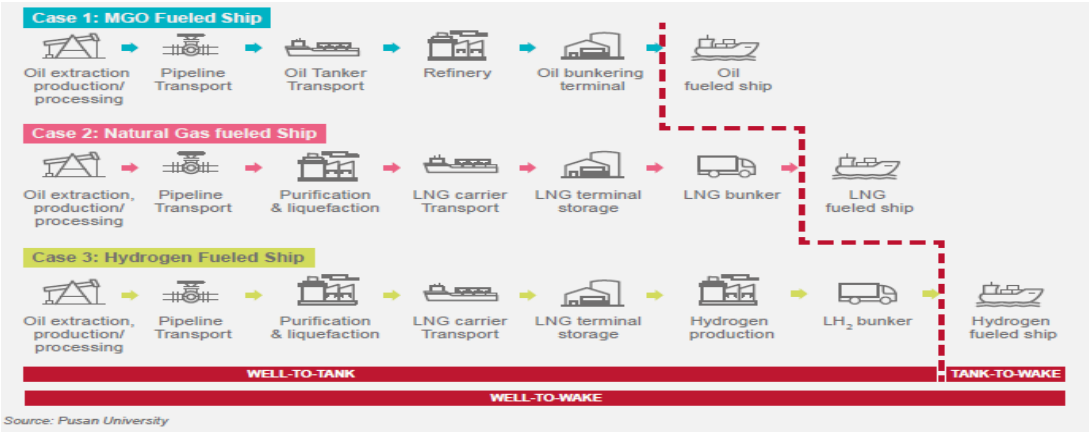
- Το πρώτο από το σημείο παραγωγής ή εξόρυξης μέχρι την παράδοσή του στο πλοίο, ***(WELL TO TANK)***
- Το δεύτερο από τη δεξαμενή του πλοίου μέχρι τη μετατροπή του σε κινητική ενέργεια περιστροφής της έλικας για την κίνηση του πλοίου, ***(TANK-TO-WEAK)***



Εικόνα 40: *επιμέρους στάδια «υπολογισμού» εκπεμπόμενων ρύπων από την παραγωγή έως την χρήση ενός καυσίμου*

Είναι προφανές ότι η παραγωγική διαδικασία του καυσίμου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη συνολική περιβαλλοντική συμπεριφορά/επιβάρυνση κι επομένως θα πρέπει να αξιολογείται παράλληλα με το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα από τη στιγμή της αποθήκευσης στις δεξαμενές του πλοίου, μέχρι τη χρήση του για την παραγωγή της ενέργειας πρόωσης που απαιτείται από την έλικα του πλοίου.

Στην παρακάτω εικόνα 41 φαίνονται οι διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής και διάθεσης 3 τύπων καυσίμων. Από την εικόνα προκύπτει μεταξύ άλλων και η πολυπλοκότητα της αξιολόγησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγικής διαδικασίας ενός καυσίμου, η οποία όσο αυξάνει κι άρα απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την ολοκλήρωσή της, οδηγεί εν γένει σε φιλικότερο καύσιμο προς το περιβάλλον κατά τη 2η φάση (Tank to Weak) της χρήσης του καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας π.χ. κατά την πρόωση ενός πλοίου.



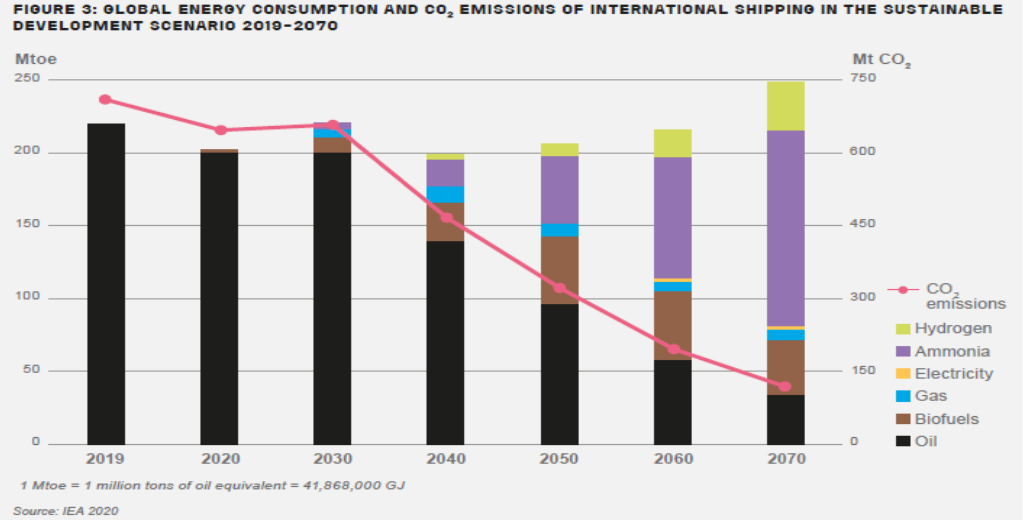
Εικόνα 41: *παραγωγική διαδικασία «Well-To-Weak» για 3 διαφορετικούς τύπους καυσίμων*

3.3.1 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ

Η υιοθέτηση της «Αρχικής Στρατηγικής του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) για τη μείωση των αερίων εκπομπών του θερμοκηπίου (GHG) από Πλοία» με το ψήφισμα του IMO MEPC.304(72) τον Απρίλιο του 2018 καταδεικνύει τη δέσμευση του IMO να υποστηρίξει τη Συμφωνία του Παρισιού. Η στρατηγική του IMO περιλαμβάνει ως αρχικούς στόχους τη

μείωση (σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008) των μέσων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανά «μεταφορικό έργο» κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, με στόχο την επιδίωξη 70% μείωση έως το 2050, με τη φιλοδοξία να μειωθούν οι συνολικές ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050.

Στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 42 φαίνεται η παγκόσμια κατανάλωση ναυτιλιακών καυσίμων σε σχέση με την εκπομπή CO2 καθώς και ένα βιώσιμο σενάριο «εισαγωγής» εναλλακτικών καυσίμων για τη μείωση του παραγόμενου CO2 με παραπλήσια συνολική κατανάλωση μίγματος διαφόρων καυσίμων.

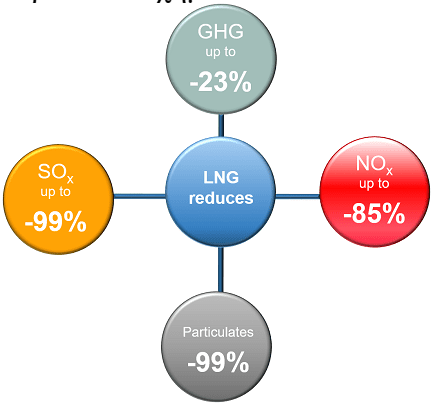


Εικόνα 42: *παγκόσμια κατανάλωση ναυτιλιακών καυσίμων και επίδραση της «εισαγωγής» νέων καυσίμων στις εκπομπές CO2*

Για την επίτευξη αυτών των στόχων θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα επόμενα χρόνια εξελιγμένες τεχνικές λύσεις, επιχειρησιακές προσεγγίσεις καθώς και εναλλακτικά καύσιμα. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (ΥΦΑ) είναι σχετικά «ώριμο» καύσιμο χαμηλών εκπομπών άνθρακα, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Η αναλογία άνθρακα προς υδρογόνο (C/H) προσφέρει μείωση των εκπομπών CO2 έως και 20% σε σύγκριση με το βασικό ευρέως χρησιμοποιούμενο βαρύ καύσιμο/μαζούτ (HFO).

Οι υποδομές ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου βελτιώνονται συνεχώς, καθιστώντας το ήδη διαθέσιμο στους περισσότερους μεγάλους ναυτιλιακούς κόμβους.

Η ευρεία μετάβαση στο ΥΦΑ ως καύσιμο μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως, ικανοποίηση των κανονιστικών απαιτήσεων, ενισχυμένη ανταγωνιστικότητα, βελτίωση της συνολικής ποιότητας του αέρα μειώνοντας τόσο τις εκπομπές GHG αλλά και άλλων αερίων ρύπων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Πιο συγκεκριμένα κι αναφορικά με τη χρήση ΥΦΑ στη Ναυτιλία:

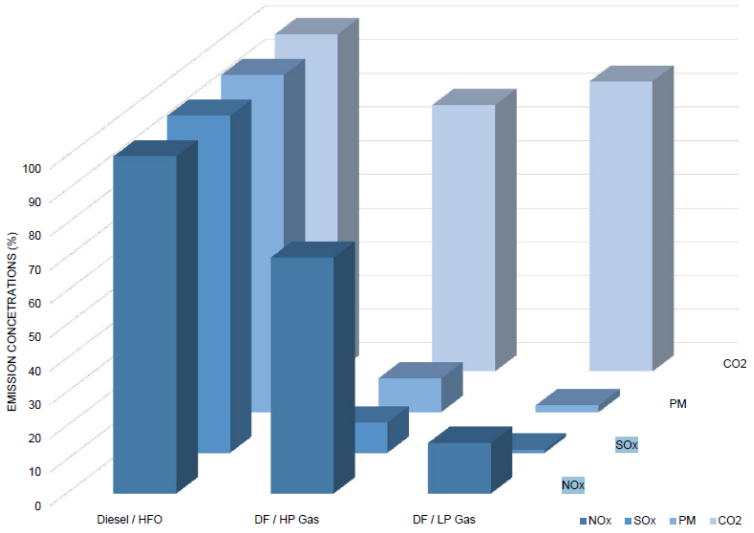
- Τα πλοία που τροφοδοτούνται με ΥΦΑ μπορούν να μειώσουν το Δείκτη/συντελεστή ενεργειακής απόδοσης τους EEDI (Energy Efficiency Design Index) κατά 20%, ενώ ο Δείκτης Έντασης Άνθρακα θα μειωθεί αντίστοιχα κατά το ίδιο ποσό περίπου.
- Ο ανταγωνιστικός σχεδιασμός σκαφών διασφαλίζει την επικείμενη συμμόρφωσή τους κατά τα επόμενα δέκα έτη περίπου, σε σχέση με πλοία συμβατικής σχεδίασης.
- Μειώνει τις εκπομπές NOx έως και 85% και σχεδόν εξαλείφει τα SOx καθώς και τα σωματίδια (PM). Οι εκπομπές NOx μειώνονται ανάλογα με την τεχνολογία του κινητήρα, ενώ με τη χρήση συστημάτων

ανακυκλοφορίας καυσαερίων EGR (Exhaust Gas Recirculation) ή καταλυτών SCR (Selective Catalytic Reactor) μπορούν να επιτευχθούν επίπεδα NOx Tier III για όλους τους τύπους κινητήρων. Οι εκπομπές σωματιδίων μειώνονται επίσης δραστικά.

- Οι εκπομπές GHG μπορούν να μειωθούν έως και 23% με τη σύγχρονη τεχνολογία κινητήρων.
- Το βιοαέριο και τα «αποσταγμένα» καύσιμα προσφέρουν μια εναλλακτική λύση για περαιτέρω μείωση της έντασης άνθρακα των πλοίων.

Στο παρακάτω ραβδόγραμμα -εικόνα 43- αποτυπώνονται οι εκπομπές ρύπων του ΥΦΑ από κινητήρες «υψηλής και χαμηλής πίεσης» παροχής αερίου, σε σχέση με συμβατικά υγρά καύσιμα (diesel και μαζούτ)

Figure 4: Dual-Fuel Engine Emissions



Εικόνα 43: εκπομπές αερίων ρύπων σε μηχανές «διπλού καυσίμου» με χρήση υγρών και αέριων καυσίμων

Για να αξιοποιηθούν αυτά τα οφέλη, είναι σημαντική η επιλογή της τεχνολογίας που ταιριάζει στον τύπο του πλοίου καθώς και στις λειτουργικές παραμέτρους του περιβάλλοντος στο οποίο θα επιχειρεί. Όσον αφορά τις εκπομπές GHG, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν τόσο αυτές του CO2 όσο και του CH4 (μεθανίου), ενώ το επίπεδο μείωσης εξαρτάται σημαντικά και από τον τύπο του κινητήρα που επιλέγεται.

Η διαφυγή άκαυστου μεθανίου (methane slip) που οφείλεται είτε σε ατελή καύση ή σε «παγίδευσή» του σε «νεκρούς» χώρους του θαλάμου καύσης, είναι μεγαλύτερη για τους 4χρονους κινητήρες απ' ό,τι για τους 2χρονους κινητήρες και εξαρτάται επίσης από το εάν οι κινητήρες χρησιμοποιούν παροχή αερίου χαμηλής (~14bar) ή υψηλής (~350 bar) πίεσης.

Οι κινητήρες υψηλής πίεσης έχουν συνήθως σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές μεθανίου από τους αντίστοιχους χαμηλής πίεσης, αλλά απαιτούν περισσότερη ενέργεια για την αύξηση της πίεσης του αερίου καυσίμου στα επιθυμητά επίπεδα .

Συμπερασματικά, το ΥΦΑ συμμορφώνεται πλήρως με τους κανονισμούς του IMO και της Ε.Ε. για τις εκπομπές ρύπων. Όταν διαφεύγει στην ατμόσφαιρα χωρίς να έχει καεί, θεωρείται αέριο του θερμοκηπίου. Σήμερα, υπάρχουν διαφορετικοί δείκτες για να αξιολογήσουν αυτό το ζήτημα, οι οποίοι δίνουν αρκετά διαφορετικές εκτιμήσεις. Όμως, ακόμα και αν λάβουμε υπόψη τη διαφυγή μεθανίου, οι σύγχρονες μηχανές ΦΑ προσφέρουν σημαντική μείωση τόσο σε καθαρές εκπομπές CO_2 όσο και στις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.

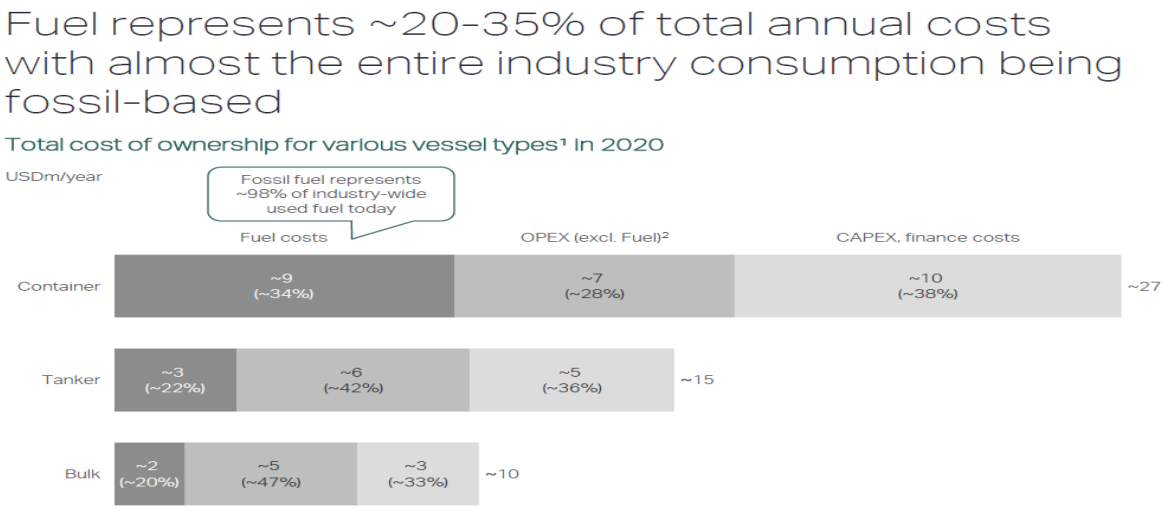
Άλλωστε οι στόχοι για τη μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου έχουν τεθεί για το έτος 2050 και μπορούν να επιτευχθούν από τον συνδυασμό χρήσης ΦΑ και καυσίμων με μηδενικό ισοζύγιο παραγωγής άνθρακα (carbon neutral), την τεχνολογία των μηχανών, καθώς και την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων, με γνώμονα πάντα τον ορίζοντα επένδυσης του εκάστοτε πλοιοκτήτη. Ως εκ τούτου, στο μέλλον η διαφυγή μεθανίου θα ελαχιστοποιηθεί, ταυτόχρονα όμως εξελίσσονται και καταλύτες (methane oxidation catalyst) που θα λύσουν οριστικά αυτό το θέμα. Συνεπώς το ΥΦΑ θεωρείται ως το βέλτιστο καύσιμο μετάβασης στην εποχή των «πράσινων» καυσίμων, χωρίς να μπορεί ακόμη να υπολογιστεί η διάρκεια της διαφαινόμενης μετάβασης.

3.3.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ

Τα παγκόσμια αποθέματα μεθανίου είναι πολύ περισσότερα από αυτά του αργού πετρελαίου. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας υπολογίζει πως προς το παρόν υπάρχει αρκετό (φυσικό αέριο) για κατανάλωση για τα επόμενα 250 χρόνια, λαμβάνοντας υπόψη τις ανανεώσιμες και μη συμβατικές πηγές φυσικού αερίου. Τα επίπεδα των τιμών του φυσικού αερίου είναι σήμερα αρκετά ελκυστικά. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση του ΥΦΑ έχει αυξηθεί σημαντικά ως αποτέλεσμα τόσο της παραγωγής όσο και του εμπορίου φυσικού αερίου. Η ανάπτυξη του εμπορίου ΥΦΑ υποστηρίχθηκε από μεγάλες επενδύσεις κεφαλαίου σε παγκόσμιο επίπεδο, με περαιτέρω έργα να βρίσκονται σε εξέλιξη ή προγραμματισμό.

Η τιμή του ΥΦΑ βρίσκεται στον πυρήνα της οικονομικής συζήτησης σχετικά με τη χρήση του ΥΦΑ ως καύσιμο πλοίου. Η χαμηλή τιμή φυσικού αερίου (εξαιρουμένων των αιχμών που πυροδοτούνται από γαιοπολιτικά γεγονότα όπως π.χ. πόλεμοι κλπ.) σε σύγκριση με το παραδοσιακό καύσιμο πετρελαίου είναι ο κύριος οικονομικός μοχλός για την εφαρμογή ΥΦΑ.

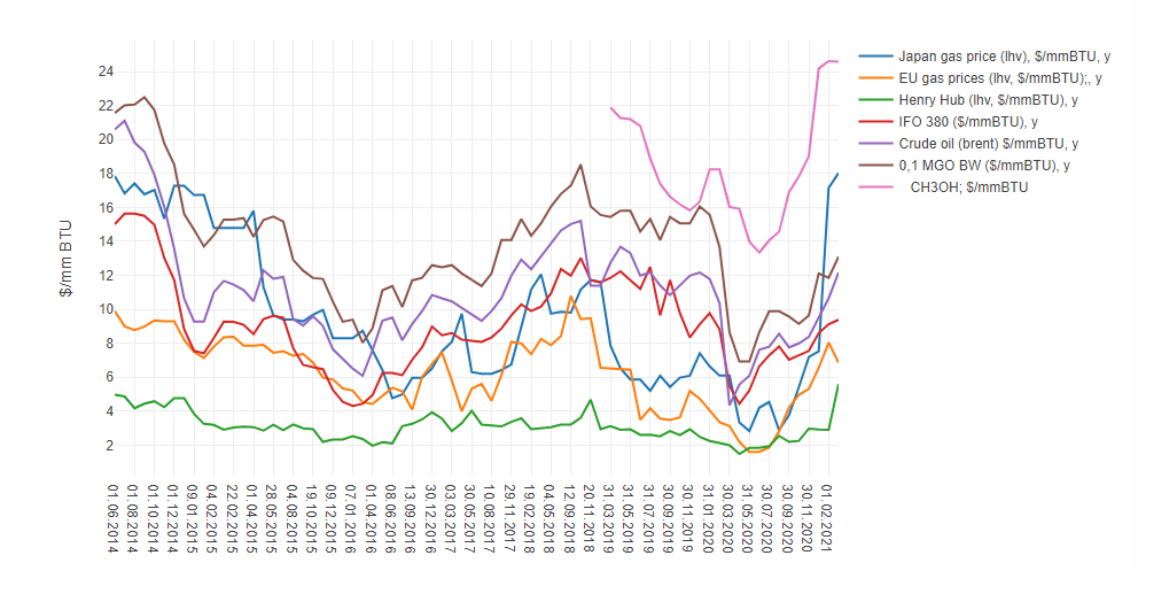
Στο παρακάτω σχήμα -εικόνα 44- φαίνεται η επίδραση του κόστους καυσίμου στα λειτουργικά κόστη διαφόρων κατηγοριών πλοίων, γεγονός που υποδηλώνει τη σημασία του εν λόγω κόστους στην οικονομική αποδοτικότητα ενός πλοίου. Συνοπτικά το κόστος καυσίμου αντιπροσωπεύει το 20-35% των λειτουργικών εξόδων του πλοίου κι ως εκ τούτου σημαντικότατο παράγοντα κερδοφορίας κι απόδοσης.



Εικόνα 44: *επίδραση του κόστους καυσίμου ανά τύπο πλοίου*

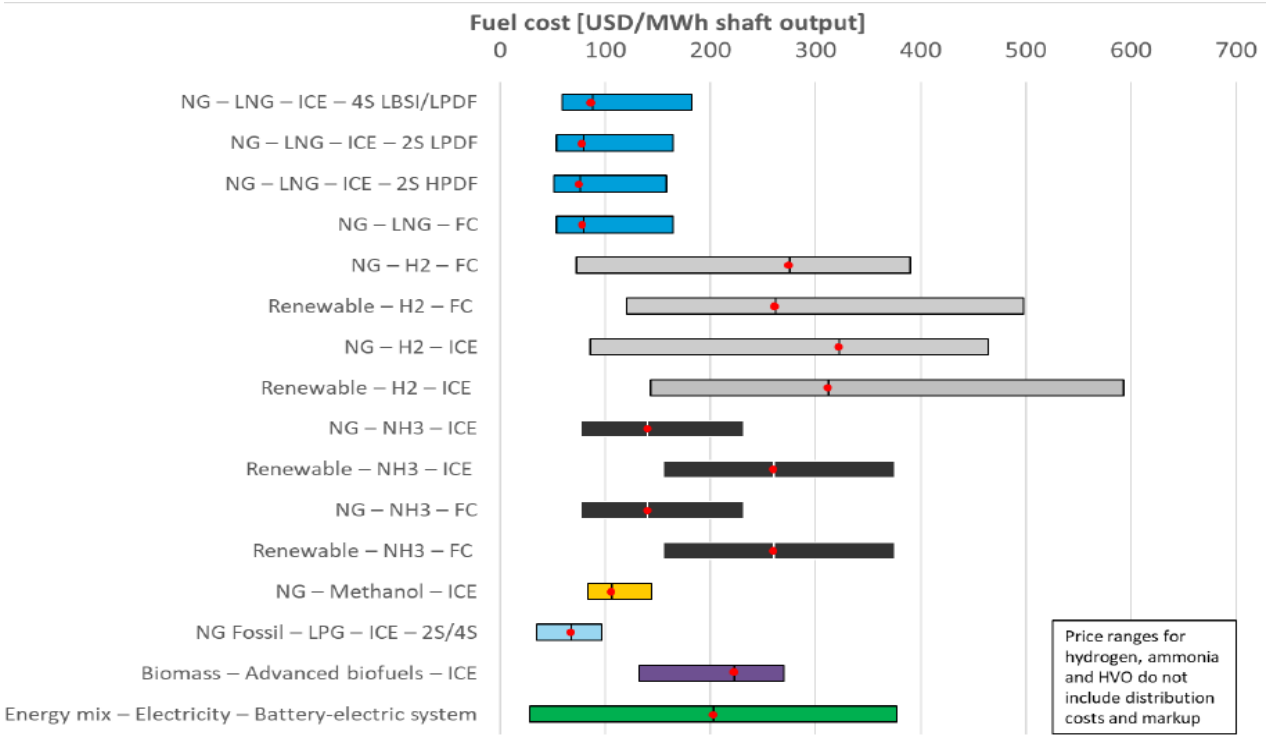
Αναφορικά τώρα με την τιμή του ΥΦΑ σε σχέση με τα λοιπά ναυτιλιακά καύσιμα παρατίθεται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 45, φαίνεται η εξέλιξη των τιμών των καυσίμων, που έχουν ως βάση τον άνθρακα και χρησιμοποιούνται στη Ναυτιλία. Το διάγραμμα περιλαμβάνει και τη μεθανόλη που θεωρείται εναλλακτικό νέο καύσιμο το οποίο παράγεται

από το ΦΑ. Η μεθανόλη κερδίζει έδαφος σε νέες κατασκευές που θέλουν να είναι έτοιμες για τις περιβαλλοντικές προκλήσεις στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. Ειδικότερα η βιο-μεθανόλη και η e-μεθανόλη μπορεί ν' αποτελέσουν σημαντική εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα με βάση τον άνθρακα.



Εικόνα45: εξέλιξη των τιμών των καυσίμων, που έχουν ως βάση τον άνθρακα

Από το διάγραμμα προκύπτει η διαχρονικά χαμηλή τιμή του ΥΦΑ σε σχέση με τα υπόλοιπα καύσιμα. Τα ίδια ανταγωνιστικά αποτελέσματα προκύπτουν και από τη σύγκριση των διαφόρων καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των «πράσινων», με βάση το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας (MWh), τα οποία φαίνονται στην εικόνα 46.



Εικόνα 46: *Προβλεπόμενο Κόστος καυσίμου σε U$D/MWh παραγόμενης ισχύος*

Πέραν του χαμηλότερου κόστους αγοράς του ΦΑ, οι κινητήρες ΥΦΑ παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος κι ανάγκες συντήρησης και επισκευής σε σύγκριση με τους κινητήρες υγρών καυσίμων, λόγω της ελαχιστοποίησης των στερεών και διαβρωτικών καταλοίπων κατά την καύση, γεγονός που οδηγεί στη διατήρηση της καθαρότητας και απόδοσης των επιμέρους συστημάτων των μηχανών αλλά και τη μεγάλη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων αυτών. Η «καθαρή» καύση, χωρίς στερεά κυρίως κατάλοιπα που παρέχει το ΦΑ, οδηγεί σε διατήρηση της ποιότητας του λιπαντικού ελαίου σε υψηλά επίπεδα, γεγονός που έχει πολύ σημαντικές κι ευεργετικές συνέπειες για τη σωστή λίπανση και καθαρότητα του κινητήρα κι επομένως υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα αυτού. Επιπλέον οι μειωμένες ανάγκες συντήρησης των μηχανών οδηγούν σε μεγαλύτερη διαθεσιμότητα του πλοίου, ελαχιστοποιώντας τις ανάγκες ακινησίας για την εκτέλεση συντηρήσεων κι άρα αύξηση των ωφέλιμων ημερών εκμετάλλευσης του πλοίου.

Στην οικονομική αξιολόγηση του ΥΦΑ , θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η επικείμενη επιβολή φόρου η οποία ήδη μελετάται από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του προγράμματος «Fit for 55», η οποία αποσκοπεί να διαμορφώσει του κανόνες της απανθράκωσης εντός της ΕΕ , με στόχο να επιτευχθεί μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030.

Στον παρακάτω πίνακα της εικόνας 47 φαίνεται η πρόταση φορολόγησης ανά τύπο καυσίμου, όπου λαμβάνοντας υπόψιν και την περιεχόμενη ενέργεια, φαίνεται η εξοικονόμηση που θα επιτευχθεί με τη χρήση ΦΑ.

Fuel	Tax rate	Energy content	Tax per ton
Heavy Fuel Oil	€0.90 / GJ from 2023	40.5 GJ / metric ton	€36.45 / metric ton
Marine Diesel Oil	€0.90 / GJ from 2023	42.7 GJ / metric ton	€38.43 / metric ton
Natural Gas	€0.60 / GJ from 2023, then €0.90 / GJ from 2033	49.1 GJ / metric ton	€29.46 / metric ton, then €44.19 / metric ton

Source: Bureau Veritas and European Commission

Εικόνα 47: πρόταση φορολόγησης ΕΕ ανά τύπο καυσίμου

Τέλος η επιβολή προστίμου ανάλογα με την ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων είναι μία ακόμη οικονομική παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά την επιλογή του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Η Ευρωπαϊκή Ένωση ήδη εργάζεται προς την κατεύθυνση αυτή βασιζόμενη στην αρχή «ανώτατο όριο και εμπόριο» σύμφωνα με την οποία ορίζεται ένα ανώτατο όριο στη συνολική ποσότητα ορισμένων αερίων θερμοκηπίου που μπορεί να εκπέμψει το πλοίο και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, έτσι ώστε οι συνολικές εκπομπές να μειωθούν. Έτσι οι ναυτιλιακές εταιρείες θα πρέπει να αγοράσουν και να παραδώσουν δικαιώματα εκπομπής για να καλύψουν κάθε τόνο άνθρακα που παράγεται στα ταξίδια, διαφορετικά θα αντιμετωπίσουν πιθανές κυρώσεις από τις λιμενικές αρχές της ΕΕ για μη συμμόρφωση. Το πρόστιμο ως προς την εκπομπή περισσότερων εκπομπών CO2 σε σύγκριση με τα δικαιώματα εκπομπής αναμένεται να είναι τουλάχιστον 100 ευρώ ανά υπέρβαση τόνου.

Σύμφωνα με την πρόταση, η εφαρμογή του «κανονισμού» στην ναυτιλιακή βιομηχανία θα μπορούσε να ξεκινήσει ήδη από το 2023 και να προχωρήσει σταδιακά σε περίοδο τριών ετών. Ισχύει για πλοία 5.000 GT και άνω, ανεξαρτήτως σημαίας και περιλαμβάνει:

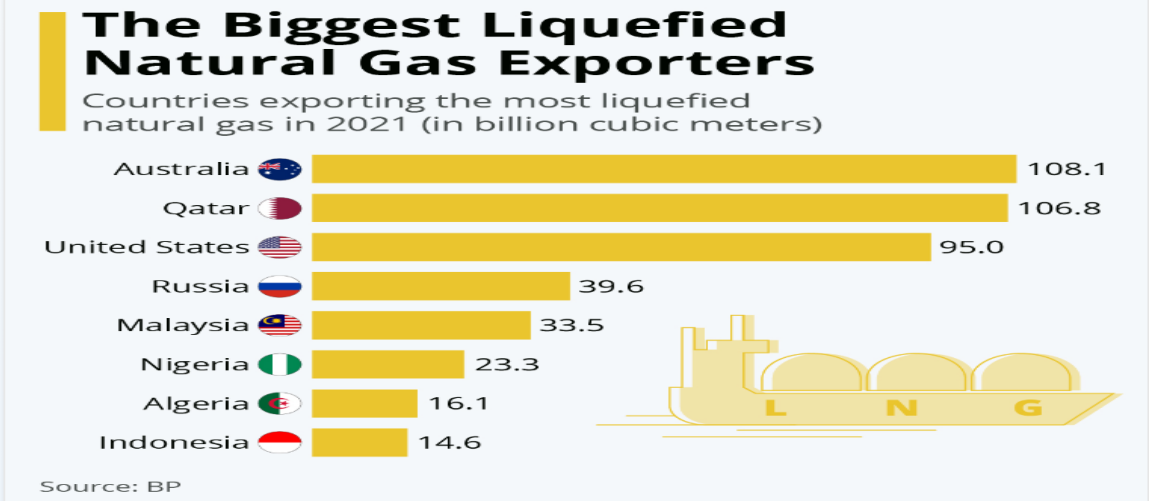
1. 100% των εκπομπών κατά την άφιξη σε λιμάνι της ΕΕ για ταξίδια εντός της ΕΕ,
2. 50% των εκπομπών από ταξίδια που ξεκινούν ή τελειώνουν εκτός ΕΕ και
3. εκπομπές που συμβαίνουν όταν τα πλοία είναι ελλιμενισμένα σε λιμένες της ΕΕ.

Η ναυτιλιακή εταιρεία υποχρεούται να υπολογίζει και να αναφέρει τις συνολικές εκπομπές σε ετήσια βάση ως εξής:
• Το 20 % των επαληθευμένων εκπομπών που αναφέρθηκαν για το 2023
• Το 45 % των επαληθευμένων εκπομπών που αναφέρθηκαν για το 2024
• Το 70 % των επαληθευμένων εκπομπών που αναφέρθηκαν για το 2025
• Το 100 % των επαληθευμένων εκπομπών που αναφέρθηκαν για το 2026 και κάθε έτος στη συνέχεια

3.3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ

ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΜΗΘΕΙΑΣ ΥΦΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ως αποτέλεσμα της αυξημένης παγκόσμιας ζήτησης για ΥΦΑ, η παραγωγή ΥΦΑ των ΗΠΑ αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία έτη με αποτέλεσμα το 2021 ν' αποτελεί την 3η εξαγωγική δύναμη παγκόσμια ενώ το 2022 προβλέπεται ν' ανέλθει στην 1η θέση, βλέπε εικόνα 48 . Οι άλλες δύο μεγαλύτερες χώρες εξαγωγής ΥΦΑ στον κόσμο είναι η Αυστραλία και μετά το Κατάρ.



Εικόνα 48: μεγαλύτεροι «χώρες» εξαγωγείς ΥΦΑ

Αν και η έλλειψη υποδομής και η αβεβαιότητα των μελλοντικών τιμών έχουν επιβραδύνει τους ρυθμούς ανάπτυξης του ΦΑ, πολλοί αναμένουν ότι το ΥΦΑ θα καθιερωθεί ως μία από τις εναλλακτικές λύσεις έναντι του μαζούτ/HFO στο μέλλον. Ο Ναυτιλιακός νηογνώμονας, Lloyd's Register, αναμένει ότι το ΥΦΑ θα λάβει το 11% του μεριδίου αγοράς καυσίμων μέχρι το 2030. Μεταξύ της δεκαετίας του 1980 και του έτους 2000, η υποδομή ανεφοδιασμού ΥΦΑ αναπτύχθηκε αρχικά σε συντηρητική και άκαμπτη βάση από σημείο σε σημείο, με σκοπό να μετριάσει τους κινδύνους λόγω του υψηλού κόστους υποδομής και να αντιμετωπίσει τους χρηματοδοτικούς περιορισμούς. Η υποδομή ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου βρίσκεται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης παγκοσμίως. Το υγροποιημένο μεθάνιο που παράγεται από βιομάζα (LBG) μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει την επεκτεινόμενη υποδομή ΥΦΑ.

Το φυσικό αέριο είναι ένα καθαρό καύσιμο που προσφέρει την προοπτική μειωμένης συντήρησης, μειωμένου χειρισμού και επεξεργασίας καυσίμου επί του πλοίου. Υπάρχουν μερικές προκλήσεις στη διαχείριση διαφορετικών ποιοτήτων φυσικού αερίου, αυτές όμως μπορούν εύκολα να ξεπεραστούν.

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ

Το ΥΦΑ είναι από τα πλέον φιλικά προς το περιβάλλον καύσιμα, η δε βιομηχανία του φυσικού αερίου θεωρείται γενικότερα μια από τις πιο ασφαλείς διεθνώς, με δεκαετίες

ιστορικού ασφαλείας και πλήθος χρήσεων σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Βεβαίως, εκ φύσεως, η διαδικασία ανεφοδιασμού ενός πλοίου πάντα προϋποθέτει προσοχή και επιβάλλει συγκεκριμένα μέτρα ασφαλείας. Μέχρι και σήμερα που μιλάμε, έχουν γίνει πολλοί ανεφοδιασμοί σε όλους τους τύπους πλοίων και μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε ότι ο ανεφοδιασμός με ΥΦΑ δεν αποτελεί ένα επιπλέον πρόβλημα. Επιπρόσθετα, καθώς χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να πραγματοποιηθεί, είναι πολύ πιο εύκολος για το πλήρωμα. Επίσης, το ΥΦΑ δεν προκαλεί κανενός είδους θαλάσσια ρύπανση, ακόμα και αν διαφύγει στη θάλασσα και σε παράκτιες περιοχές. Συνεπώς, ο ανεφοδιασμός πλοίων με ΥΦΑ διαθέτει μεγάλα πλεονεκτήματα ως προς την αποφυγή θαλάσσιων καταστροφών, προερχόμενων από διαδικασίες ανεφοδιασμού, που θα απειλούσαν το θαλάσσιο οικοσύστημα.

Η διαδικασία ανεφοδιασμού πλοίων με ΦΑ μπορεί να γίνει τόσο από τη στεριά μέσω βυτιοφόρων - Εικόνα 49-, όσο και δια της θαλάσσης μέσω ειδικών πλοίων - Εικόνα 50- (small scale ΥΦΑ)



Εικόνα 49: *ανεφοδιασμός πλοίου μέσω βυτιοφόρου*

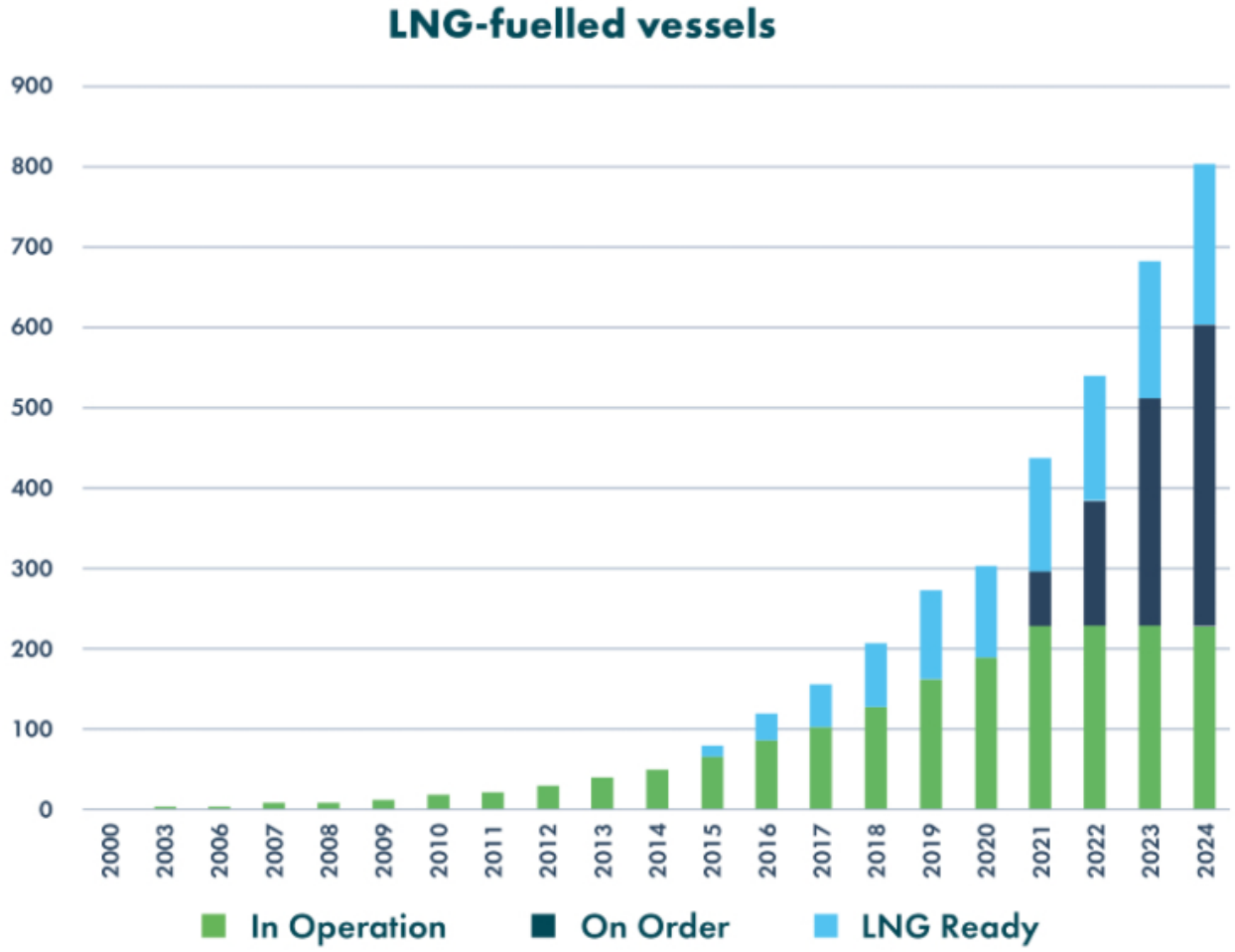


Εικόνα 50:*ανεφοδιασμός πλοίου μέσω υγραεριοφόρου μικρής κλίμακας*

ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΥΦΑ

Ο αριθμός των πλοίων που χρησιμοποιούν ΥΦΑ ως καύσιμο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα -Εικόνα 51- αυξάνεται συνεχώς, ενώ όλοι οι κατασκευαστές Μ.Ε.Κ. έχουν ήδη έτοιμες λύσεις μετατροπών τόσο για 2-Χρονους όσο και 4-Χρονους κινητήρες , έτσι ώστε υπάρχοντα πλοία, να μπορούν να χρησιμοποιήσουν και ΥΦΑ ως καύσιμο, πέρα από το υγρά καύσιμα με τα οποία ήδη λειτουργούν. Στο διάγραμμα αποτυπώνονται πλοία που είναι ήδη σε λειτουργία, πλοία που είναι υπό παραγγελία, καθώς και πλοία που έχουν την υποδομή να λειτουργήσουν με ΦΑ όποτε απαιτηθεί.

Με τον τρόπο αυτό, ειδικά τα νεότερα πλοία ,θα μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε εναλλακτικό «πράσινο» καύσιμο (υγρό ή αέριο), με χαμηλού ύψους επενδύσεις, έτσι ώστε να βελτιώσουν περαιτέρω το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.



Εικόνα 51: αριθμός πλοίων που χρησιμοποιούν ΥΦΑ ως καύσιμο

3.4 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΦΑ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Μόνο ένας περιορισμένος αριθμός λιμένων έχει θεσπίσει τοπικούς κανόνες για ανεφοδιασμό με υγροποιημένο φυσικό αέριο, ενώ υπάρχει ένα σχετικό πρότυπο ISO για τον ανεφοδιασμό πλοίων με ΥΦΑ [ISO 20519:2017 «Πλοία και θαλάσσια τεχνολογία - Προδιαγραφή για ανεφοδιασμό πλοίων με υγροποιημένο φυσικό αέριο»]. Η έλλειψη υποδομής ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου για πλοία με καύσιμο ΥΦΑ σε μεγάλα λιμάνια

ανά τον κόσμο αποτελεί εμπόδιο για την περαιτέρω ευρεία χρήση του ΥΦΑ ως καύσιμο πλοίων.

Μέχρι σήμερα, υπάρχουν σχεδόν 200 λιμάνια εξοπλισμένα με εγκαταστάσεις καυσίμων ΥΦΑ σε όλο τον κόσμο. Η Ευρώπη και η Ασία καταγράφουν τη μεγαλύτερη συγκέντρωση τέτοιων υποδομών. Ωστόσο, η επέκταση αυτών των υποδομών αποτελεί σημαντική πρόκληση. Για παράδειγμα, το ΥΦΑ πρέπει να αποθηκεύεται σε κρυογονικές θερμοκρασίες, οι οποίες απαιτούν εκτεταμένες μετασκευές στις υπάρχουσες υποδομές.

ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Με την υιοθέτηση του Κώδικα IMO IGF11 για το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (ΥΦΑ) και το Συμπιεσμένο Φυσικό Αέριο (CNG), που ισχύει από 1.1.2017, έχει καθιερωθεί ένα διεθνές ρυθμιστικό πλαίσιο για το σχεδιασμό και την κατασκευή πλοίων με καύσιμα ΥΦΑ. Τα πλοία που καίνε ΥΦΑ απαιτούν ειδικά εκπαιδευμένα πληρώματα. Αυτοί οι αξιωματικοί βρίσκονται σε έλλειψη σε όλο τον κόσμο.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

Σύμφωνα με στοιχεία της Clarksons Research Limited 2020 Database12, όσον αφορά τους μεταφορείς χωρίς ΥΦΑ, η χρήση ΥΦΑ ως καυσίμου είναι πιο βιώσιμη για δεξαμενόπλοια παρά για πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και γενικά πλοία ξηρού φορτίου, ενώ για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, το ΥΦΑ θα μπορούσε να είναι βιώσιμο σε ορισμένες διαδρομές. Το ΥΦΑ αποτελεί ένα ισχυρό ορυκτό καύσιμο που χρησιμοποιείται ήδη αλλά δεν είναι βιώσιμο για ένα σημαντικό μέρος του παγκόσμιου στόλου. Η ενεργειακή πυκνότητα του ΥΦΑ είναι 40-45% χαμηλότερη από αυτή του HFO. Υπάρχει υψηλό κόστος κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX) για συστήματα αποθήκευσης και περιορισμού καυσίμων σε μεταφορείς μη ΥΦΑ. Ως εκ τούτου, η χρήση του ΥΦΑ ως καυσίμου πλοίων μπορεί να γίνει μια σημαντική ενδιάμεση λύση σε συνδυασμό με κινητήρες DF μόνο για ορισμένους τομείς.

ΔΙΑΦΥΓΗ ΑΚΑΥΣΤΟΥ ΜΕΘΑΝΙΟΥ

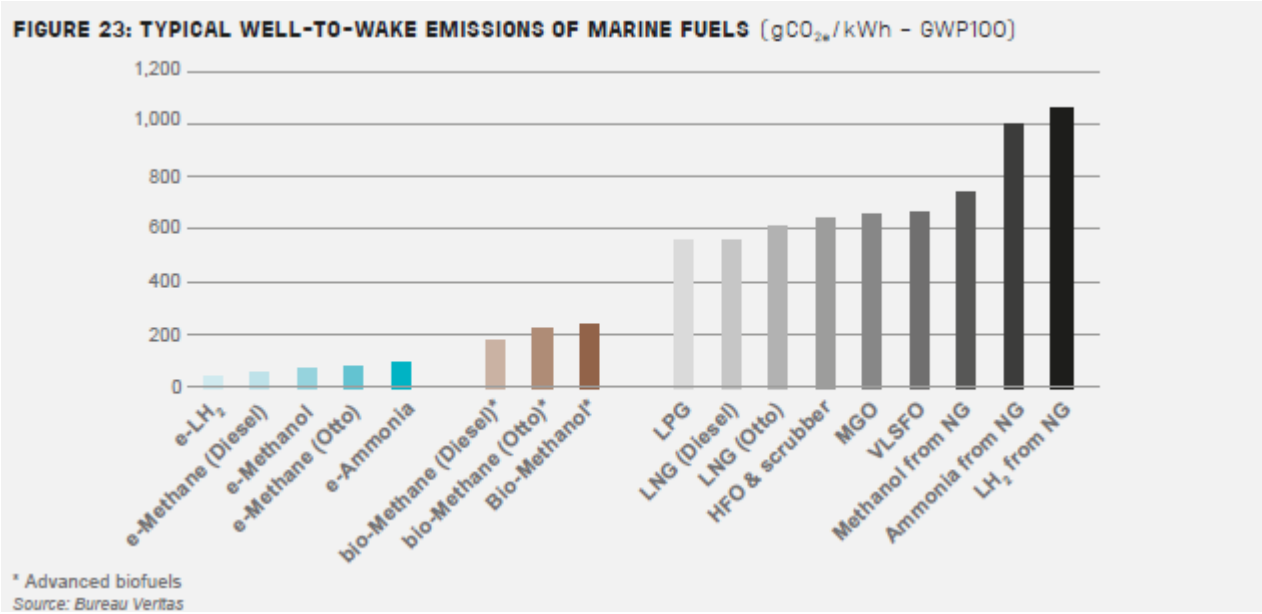
Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τρέχοντες κινητήρες ΥΦΑ υπόκεινται σε μια διαφυγή άκαυστου μεθανίου μεταξύ 2% και 5% και το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) του μεθανίου σε χρονικό ορίζοντα 20 ετών είναι 56 φορές υψηλότερο από το GWP που συνδέεται με το CO2. Επομένως το μάλλον ‘’χαμηλό’’ δυναμικό του ΥΦΑ για τη βαθιά απαλλαγή από τον άνθρακα στη διεθνή ναυτιλία τονίζεται από το γεγονός ότι σε ενεργειακή βάση, η περιεκτικότητα του ΥΦΑ σε CO2 είναι μόνο 26% χαμηλότερη από εκείνη του μαζούτ. Συνεπώς, είναι κρίσιμο να επικεντρωθούν οι προσπάθειες στα καύσιμα που θα παράγονται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με τη δυνατότητα να απελευθερώσουν τη διεθνή ναυτιλία από τον άνθρακα έως το 2050,γεγονός που θα συμβάλλει και στην επίτευξη του στόχου της μείωσης της υπερθέρμανσης του πλανήτη κατά 1,5°C έως το 2050.

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρακάτω συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα χρήσης του ΥΦΑ ως καύσιμο στη Ναυτιλία:

Εκπομπές Ρύπων

Η χρήση του ΥΦΑ ως θαλάσσιου καυσίμου, ανάλογα με την τεχνολογία του κινητήρα, προσφέρει μειώσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) έως και 21% στη βάση Well-to-Wake – βλ. εικόνα 52- και 28% Tank-to-Wake, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης των εκπομπών άκαυστου μεθανίου σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων. Δεν εκπέμπει ουσιαστικά οξείδια του θείου (SOx) και σωματίδια (PM). Σε σύγκριση με το υπάρχον «βαρύ καύσιμο»/μαζούτ, το ΥΦΑ μπορεί, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, να εκπέμπει έως και 95% λιγότερες εκπομπές οξειδίου του αζώτου (NOx). Ως εκ τούτου, είναι συμβατό με τα όρια εκπομπών SOx και NOx στις παράκτιες περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA) και με το παγκόσμιο ανώτατο όριο θείου του IMO.



Εικόνα 52: *συνολική εικόνα εκπομπών CO_2 των διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων*

<u>ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΠΟΙΗΣΗ</u>

Επενδύοντας τώρα σε πλοία με καύσιμο ΥΦΑ, οι πλοιοκτήτες μπορούν να αποκομίσουν άμεσα οφέλη GHG - έως και 28%- στη βάση Tank-to-Wake, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων των εκπομπών μεθανίου.

Σε συνδυασμό με μέτρα απόδοσης που αναπτύσσονται για νέα πλοία ως απόκριση στον Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) του IMO, το ΥΦΑ παρέχει έναν τρόπο επίτευξης του στόχου του IMO για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές για μείωση 40% έως το 2030 για τη διεθνή ναυτιλία.

Μακροπρόθεσμα το ΥΦΑ προσφέρει ένα μονοπάτι απαλλαγής από τον άνθρακα ώστε η ναυτιλία να γίνει ουδέτερη ως προς τον άνθρακα μέσω της χρήσης υγροποιημένου βιομεθανίου (LBM) που παράγεται από βιομάζα και υγροποιημένου συνθετικού μεθανίου (LSM) που παράγεται από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Το LBM και το LSM είναι επεκτάσιμες λύσεις για τον ναυτιλιακό τομέα, με εκτιμώμενες βιώσιμες παγκόσμιες προμήθειες να υπερβαίνουν δυνητικά τις απαιτήσεις της ναυτιλίας στο μέλλον και πιθανόν να είναι εμπορικά ανταγωνιστικές σε σχέση με άλλα καύσιμα χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Επιπλέον, ο αυξανόμενος στόλος με καύσιμα ΥΦΑ θα μπορούσε να χρησιμοποιεί LBM ή LSM χωρίς να απαιτούνται σημαντικές τροποποιήσεις και η υπάρχουσα υποδομή ανεφοδιασμού θα παραμείνει κατάλληλη για σκοπούς ανεφοδιασμού καυσίμων με οποιοδήποτε καύσιμο. Σε αντίθεση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα, όπως το ανανεώσιμο υδρογόνο και η αμμωνία, το ΥΦΑ είναι επιχειρησιακά αποδεδειγμένο, εμπορικά βιώσιμο, διαθέσιμο και επεκτάσιμο τώρα.Το ΥΦΑ είναι η μόνη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά πετρέλαια καύσης πλοίων που είναι εμπορικά βιώσιμα για την υπερπόντια ναυτιλία.

<u>Διαθεσιμότητα</u>

Το ΦΑ είναι ένα παγκόσμιο εμπόρευμα με 21 χώρες που εξάγουν σε 42 εισαγωγείς και αντιπροσωπεύει περίπου το 11% της παγκόσμιας κατανάλωσης φυσικού αερίου. Η διείσδυση στην αγορά αυξάνεται σε περιοχές όπως η Κίνα, η Λατινική Αμερική, η Μέση Ανατολή, η Αφρική και τμήματα της νοτιοανατολικής Ασίας με 26 τερματικούς σταθμούς εισαγωγής υπό κατασκευή.

Η αγορά ΥΦΑ είναι επί του παρόντος υπερεφοδιασμένη – το 2019 σημείωσε αύξηση ρεκόρ όλων των εποχών στην ετήσια παραγωγή ΥΦΑ, λόγω των νέων εγκαταστάσεων υγροποίησης και των αυξήσεων στις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Ρωσία και την Αυστραλία.

Υπάρχει αύξηση των επενδύσεων σε λύσεις ΥΦΑ για τη μεταφορά και αλλαγές στην εμπορία και εμπορία ΥΦΑ. Το ΥΦΑ μικρής έως μεσαίας κλίμακας έχει απογειωθεί, εξυπηρετώντας τη ζήτηση από έργα ηλεκτρικής ενέργειας εκτός δικτύου καθώς και μεταφορές με μέσα όπως φορτηγά, τρένα και πλοία.

Η υποδομή ανεφοδιασμού για την υποστήριξη του ΥΦΑ ως καυσίμου πλοίων συνεχίζει να αυξάνεται. Τώρα μπορεί να παραδοθεί σε πλοία σε περίπου 96 λιμάνια, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων από τα κύρια λιμάνια ανεφοδιασμού καυσίμων, με άλλα 55 λιμάνια στη διαδικασία διευκόλυνσης των επενδύσεων και των λειτουργιών ανεφοδιασμού ΥΦΑ.

Υπήρξε μια δραματική κλιμάκωση του ανεφοδιασμού από πλοίο σε πλοίο. Στις αρχές του 2019 υπήρχαν μόλις έξι πλοία ανεφοδιασμού ΥΦΑ σε όλο τον κόσμο. Από τον Ιανουάριο του 2020, λειτουργούν 12 με άλλα επιπλέον 27 υπό παραγγελία ή/και υπό θέση σε λειτουργία, ενώ η πλειοψηφία πρόκειται να τεθεί σε λειτουργία εντός των επόμενων δύο ετών.

ΑΣΦΑΛΕΙΑ

Το ΥΦΑ ως καύσιμο πλοίων έχει αποδεδειγμένο ιστορικό ασφάλειας με καθιερωμένα πρότυπα, οδηγίες και πρωτόκολλα λειτουργίας. Η βιομηχανία μεταφοράς ΥΦΑ χύδην, όπου το ΥΦΑ χρησιμοποιείται συνήθως ως καύσιμο για το μεταφορικό σκάφος, έχει εξαιρετικό ιστορικό ασφάλειας.

Τα τελευταία 50 χρόνια, περισσότερα από 100.000 εμπορικά φορτία ΥΦΑ έχουν παραδοθεί με ασφάλεια και οι παγκόσμιες αποστολές ΥΦΑ έχουν διανύσει περισσότερα από 130 εκατομμύρια μίλια - περίπου 5.000 φορές γύρω από τη γη - χωρίς κανένα σοβαρό περιστατικό ασφάλειας στο λιμάνι ή στη θάλασσα. Αυτό αποτελεί απόδειξη των αυστηρών οδηγιών σχεδιασμού της βιομηχανίας ΥΦΑ τόσο για πλοία όσο και για εγκαταστάσεις στην ξηρά, καθώς και για υψηλά πρότυπα εκπαίδευσης και λειτουργίας.

Η χρήση του ΥΦΑ ως καυσίμου πλοίων εκτός της επιχείρησης μεταφοράς ΥΦΑ είναι μια σχετικά νέα χρήση του καυσίμου, καθώς και κινητήρων μόνο αερίου και διπλού καυσίμου. Ωστόσο, από τότε που εισήχθη ως καύσιμο πλοίων στις αρχές του αιώνα, τα πλοία με καύσιμα ΥΦΑ και οι συναφείς εργασίες ανεφοδιασμού καυσίμων είχαν ένα υποδειγματικό ιστορικό ασφάλειας. Για παράδειγμα, το κρουαζιερόπλοιο Viking Grace έχει ανεφοδιαστεί, χωρίς κανένα περιστατικό, περισσότερες από 2.000 φορές στη Στοκχόλμη από τότε που τέθηκε σε λειτουργία το 2013 και το σκάφος ανεφοδιασμού Coralius, μέλος SEA-ΥΦΑ, Gasum's, έχει ολοκληρώσει με ασφάλεια περισσότερες από 200 ανεφοδιασμούς ΥΦΑ από πλοίο σε πλοίο από το 2017.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΥΦΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΤΟΣΟ ΜΕ ΟΡΥΚΤΑ ΑΛΛΑ ΚΑΙ ΜΕ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ «ΠΡΑΣΙΝΑ» ΚΑΥΣΙΜΑ ΑΠΟ Α.Π.Ε.

Παρακάτω παρατίθενται συγκριτικοί πίνακες τόσο ποιοτικών (εικόνα 53) όσο και λειτουργικών (εικόνα 54) χαρακτηριστικών του ΥΦΑ ως προς τα υπόλοιπα ναυτιλιακά καύσιμα που είτε χρησιμοποιούνται ή είναι υπό θεώρηση για μελλοντική χρήση και στη Ναυτιλία.



Energy source	Fossil (without CCS)					Bio	Renewable[3]		
Fuel	HFO + scrubber	Low sulphur fuels	LNG	Methanol	LPG	HVO (Advanced biodiesel)	Ammonia	Hydrogen	Fully-electric
High priority parameters									
• Energy density									
• Technological maturity									
• Local emissions									
• GHG emissions			[2]						
• Energy cost									[4]
• Capital cost (Converter / Storage)									
• Bunkering availability									
Commercial readiness [1]									[5]
Other key parameters									
• Flammability									
• Toxicity									
• Regulations and guidelines									
• Global production capacity and locations									

[1] Taking into account maturity and availability of technology and fuel.
[2] GHG benefits for LNG, methanol and LPG will increase proportionally with the fraction of corresponding bio- or synthetic energy carrier used as a drop-in fuel.
[3] Results for ammonia, hydrogen and fully-electric shown only from renewable energy sources since this represents long term solutions with potential for decarbonizing shipping. Production from fossil energy sources without CCS (mainly the case today) will have a significant adverse effect on the results.
[4] Large regional variations.
[5] Needs to be evaluated case-by-case. Not applicable for deep-sea shipping.

Εικόνα 53: *ποιοτικά χαρακτηριστικά ναυτιλιακών καυσίμων*

TYPICAL PROPERTIES OF MAIN ALTERNATIVE FUELS

	LNG	LPG	Methanol	Bio-Diesel	Ammonia	Hydrogen
Physical properties for storage	Liquid at -162°C	Liquid at 18 bar or at -42°C or semi-20°C at 7 bar	Liquid (up to 65°C)	Liquid	Liquid at -33°C	Compressed gas at > 250 bar or liquid at -253°C
Fuel tank size for same energy content as MDO	1.8 times	1.5 times	2.5 times	1 time	3 times	5-7 times
Fuel Containment System (Cryo/ conventional)	CRYO	COLD	CONV	CONV	COLD	CRYO
Flammability limits in air (%V/V)	5%-15% (Methane)	1% to 11%	6%-36.5%	/	15%-28%	4-75%
Minimum Ignition Energy (mJ)	0.3 (Methane)	0.25	0.14	/	8 to 680	0.017
Flashpoint (°C)	-188	-104	12	>61	132	
Density of liquid phase (kg/m³)	450	493	790	900	696	71
LCV (MJ/kg)	50	46.4	19.9	42.7	18.6	120
Energy density (MJ/L)	21.2	26.5	15.7	35.7	12.7	8.5

Source: Bureau Veritas

Εικόνα 54: *λειτουργικά χαρακτηριστικά ναυτιλιακών καυσίμων*

4. ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ & ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΥΦΑ – ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΩΤΥΠΩΜΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια οικονομική ανάπτυξη βασίζεται στο εμπόριο που εκτελείται μέσω της ναυτιλίας. Αναμένεται το παγκόσμιο θαλάσσιο εμπόριο να φτάσει σε περισσότερους από 15.000 εκατομμύρια τόνους έως το 2035, με ελαφρά αύξηση μακροπρόθεσμα. Για το λόγο αυτό, οι εκπομπές των πλοίων θεωρούνται σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης που έχει αρνητικό αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και το ατμοσφαιρικό περιβάλλον.

Αέρια θερμοκηπίου (GHGs/Green House Gases), όζον και πρόδρομες ουσίες αερολύματος, θείο οξείδια (SOX), σωματίδια (PM), οξείδια του αζώτου (NOX) και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) είναι οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και προκαλούν την κλιματική αλλαγή . Η τοξικότητα αυτών των ρύπων είναι επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τα καύσιμα που σχετίζονται με τις εκπομπές SOX και NOX είναι η κύρια αιτία της όξινης βροχής και του εδάφους αφού και τα δύο μετατρέπονται εύκολα σε ενεργό οξύ.

Οι εκπομπές NOX, SOX και PM είναι επίσης τοξικές για τον άνθρωπο. Τουλάχιστον το 70% των εκπομπών από πλοία που εκτελούν δρομολόγια σε διεθνή δρομολόγια πραγματοποιούνται σε απόσταση 400 χιλιομέτρων από την ακτή, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες. Για τους λόγους αυτούς, είναι ζωτικής σημασίας να βελτιωθεί η ναυτιλιακή νομοθεσία για τη μείωση των εκπομπών και των επιπτώσεών τους στη φύση.

Η διεθνής Ναυτιλία, από την άλλη πλευρά, συνεισφέρει 2% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι συνολικές εκπομπές GHG από τη ναυτιλιακή βιομηχανία αυξήθηκαν κατά 9,6%μεταξύ 2012 (977 Mt) και 2018 (1076 Mt4), σύμφωνα με την τέταρτη μελέτη GHG του IMO. Ως αποτέλεσμα, το μερίδιο των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών που αποδίδεται στη ναυτιλία αυξήθηκε από 2,76% το 2012 σε 2,89% το 2018. Την ίδια περίοδο οι εκπομπές CO2 αυξήθηκαν κατά 9,3%, από 962 Mt σε 1056 Mt.

Επιπλέον, οι συνολικές εκπομπές (διεθνείς και εγχώριες) αναμένεται να αυξηθούν από περίπου 1000MT CO2 το 2018 σε 1000–1500MT CO2 έως το 2050, που αντιπροσωπεύει αύξηση 0–50% από τα επίπεδα του 2018 και αύξηση 90–130% σε σχέση με τα επίπεδα του 2008. Οι εκπομπές από τη ναυτιλία που σχετίζονται με τη δυνητική ανάπτυξη της οικονομίας και αλλαγές στον ενεργειακό τομέα, θα μπορούσαν να αυξηθούν κατά 50 έως 250% έως το 2050.

Τα αέρια θερμοκηπίου (GHG) θερμαίνουν τη Γη απορροφώντας ενέργεια και επιβραδύνοντας τον ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια διαφεύγει στο διάστημα, λειτουργώντας σαν μια «κουβέρτα» που μονώνει τη Γη. Διαφορετικά αέρια του θερμοκηπίου (GHG) μπορεί να έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στη θέρμανση της Γης. Δύο βασικοί τρόποι με τους οποίους αυτά τα αέρια διαφέρουν μεταξύ τους είναι η ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια και το πόσο καιρό παραμένουν στην ατμόσφαιρα (γνωστό και ως «διάρκεια ζωής»).

Το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP/Global Warming Potential) αναπτύχθηκε για να επιτρέπει συγκρίσεις των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη διαφορετικών αερίων. Συγκεκριμένα, είναι ένα μέτρο του πόση ενέργεια θα απορροφήσουν οι εκπομπές 1 τόνου αερίου σε μια δεδομένη χρονική περίοδο, σε σχέση με την ενέργεια που θα απορροφηθεί από τις εκπομπές 1 τόνου διοξειδίου του άνθρακα (CO2). Όσο μεγαλύτερο είναι το GWP, τόσο περισσότερο ένα δεδομένο αέριο θερμαίνει τη Γη σε σύγκριση με το CO2 κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Η χρονική περίοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για το GWP είναι 100 χρόνια. Το GWP παρέχει μια κοινή μονάδα μέτρησης, η οποία επιτρέπει στους αναλυτές να αθροίζουν εκτιμήσεις εκπομπών διαφορετικών αερίων (π.χ. να συντάσσουν εθνικό κατάλογο GHG) βοηθώντας τους υπεύθυνους στη χάραξη πολιτικής η οποία θα συγκρίνει τις δυνατότητες μείωσης εκπομπών σε τομείς και αέρια.

Το CO2, εξ ορισμού, έχει GWP 1 ανεξάρτητα από τη χρονική περίοδο που χρησιμοποιείται, επειδή είναι το αέριο που χρησιμοποιείται ως αναφορά. Το CO2 παραμένει στο κλιματικό σύστημα για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα: οι εκπομπές CO2 προκαλούν αυξήσεις στις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO2 που θα διαρκέσουν χιλιάδες χρόνια. Το μεθάνιο (CH4) εκτιμάται ότι έχει GWP 27-30 για 100 χρόνια. Το CH4 που εκπέμπεται σήμερα διαρκεί περίπου μια δεκαετία κατά μέσο όρο, που είναι πολύ λιγότερος χρόνος από το CO2. Αλλά το CH4 απορροφά επίσης πολύ περισσότερη ενέργεια από το CO2. Το καθαρό αποτέλεσμα της μικρότερης διάρκειας ζωής και της υψηλότερης απορρόφησης ενέργειας αντανακλάται στο GWP. Το GWP του CH4 αντιπροσωπεύει επίσης ορισμένες έμμεσες επιδράσεις, όπως το γεγονός ότι το CH4 είναι πρόδρομος του όζοντος και το όζον είναι το ίδιο ένα GHG. Το υποξείδιο του αζώτου (N2O) έχει GWP 273 φορές μεγαλύτερο από αυτό του CO2 για μια χρονική κλίμακα 100 ετών. Το N2O που εκπέμπεται σήμερα παραμένει στην ατμόσφαιρα για περισσότερα από 100 χρόνια, κατά μέσο όρο. Οι χλωροφθοράνθρακες (CFC), οι υδροφθοράνθρακες (HFC), οι υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC), οι υπερφθοράνθρακες (PFCs) και το εξαφθοριούχο θείο (SF6) ονομάζονται μερικές φορές αέρια υψηλού GWP επειδή, για μια δεδομένη ποσότητα μάζας, παγιδεύουν πολύ περισσότερη θερμότητα από το CO2. (Το GWP για αυτά τα αέρια μπορεί να είναι σε χιλιάδες ή δεκάδες χιλιάδες.)

Οι Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιούν κυρίως το 100ετές GWP ως μέτρο του σχετικού αντίκτυπου των διαφορετικών αερίων θερμοκηπίου GHG. Ωστόσο, η επιστημονική κοινότητα έχει αναπτύξει μια σειρά από άλλες μετρήσεις που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση ενός GHG με ένα άλλο. Αυτές οι μετρήσεις ενδέχεται να διαφέρουν με βάση το χρονικό πλαίσιο, το τελικό σημείο του κλίματος που μετρήθηκε ή τη μέθοδο υπολογισμού.

Για παράδειγμα, το 20ετές GWP χρησιμοποιείται μερικές φορές ως εναλλακτική του 100χρονου GWP. Ακριβώς όπως το 100ετές GWP βασίζεται στην ενέργεια που απορροφάται από ένα αέριο για 100 χρόνια, έτσι και το 20ετές GWP βασίζεται στην ενέργεια που απορροφάται σε διάστημα 20 ετών. Το 20ετές GWP δίνει προτεραιότητα στα αέρια με μικρότερη διάρκεια ζωής, επειδή δεν λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις που συμβαίνουν σε περισσότερα από 20 χρόνια μετά την εμφάνιση των εκπομπών. Επειδή όλα τα GWP υπολογίζονται σε σχέση με το CO2, τα GWP που βασίζονται σε μικρότερο χρονικό πλαίσιο θα είναι μεγαλύτερα για αέρια με διάρκεια ζωής μικρότερη από αυτή του CO2 και μικρότερα για αέρια με διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από το CO2. Για παράδειγμα, για το CH4, το οποίο έχει μικρή διάρκεια ζωής, το GWP 100 ετών 27–30 είναι πολύ μικρότερο από το GWP 20 ετών 81–83. Για το CF4, με διάρκεια ζωής 50.000 ετών, το 100-ετές GWP του 7380, είναι μεγαλύτερο από το GWP 20 ετών που είναι 5300.

Μια άλλη εναλλακτική μέτρηση είναι το δυναμικό παγκόσμιας θερμοκρασίας (GTP/Global Temperature potential). Ενώ το GWP είναι ένα μέτρο της θερμότητας που απορροφάται σε μια δεδομένη χρονική περίοδο λόγω των εκπομπών ενός αερίου, το GTP είναι ένα μέτρο της μεταβολής της θερμοκρασίας στο τέλος αυτής της χρονικής περιόδου (και πάλι σε σχέση με το CO2). Ο υπολογισμός του GTP είναι πιο περίπλοκος από αυτό για το GWP, καθώς απαιτεί μοντελοποίηση του πόσο ανταποκρίνεται το κλιματικό σύστημα σε αυξημένες συγκεντρώσεις GHG (η ευαισθησία του κλίματος) και πόσο γρήγορα ανταποκρίνεται το σύστημα (με βάση εν μέρει τον τρόπο με τον οποίο ο ωκεανός απορροφά θερμότητα).

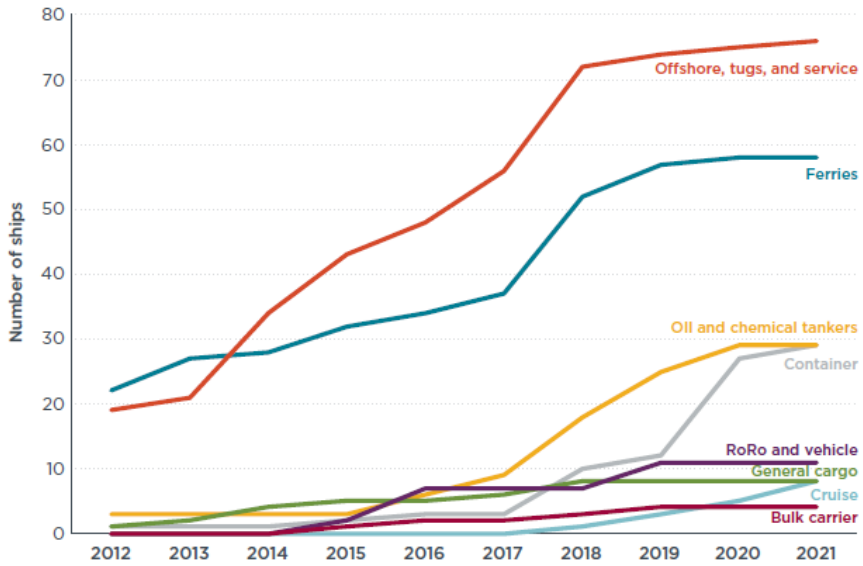
4.2 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ-ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Το 2018, ο IMO υιοθέτησε μια αρχική στρατηγική για τη μείωση και τελικά την εξάλειψη των αερίων του θερμοκηπίου από τον κλάδο της διεθνούς ναυτιλίας. Αυτή η μετάβαση θα απαιτήσει τη χρήση καυσίμων που περιέχουν λιγότερο άνθρακα και τελικά «μηδενικό» άνθρακα. Το ΥΦΑ περιέχει λιγότερο άνθρακα ανά μονάδα ενέργειας από τα

συμβατικά καύσιμα πλοίων, πράγμα που σημαίνει ότι η καύση του εκπέμπει λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO2). Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

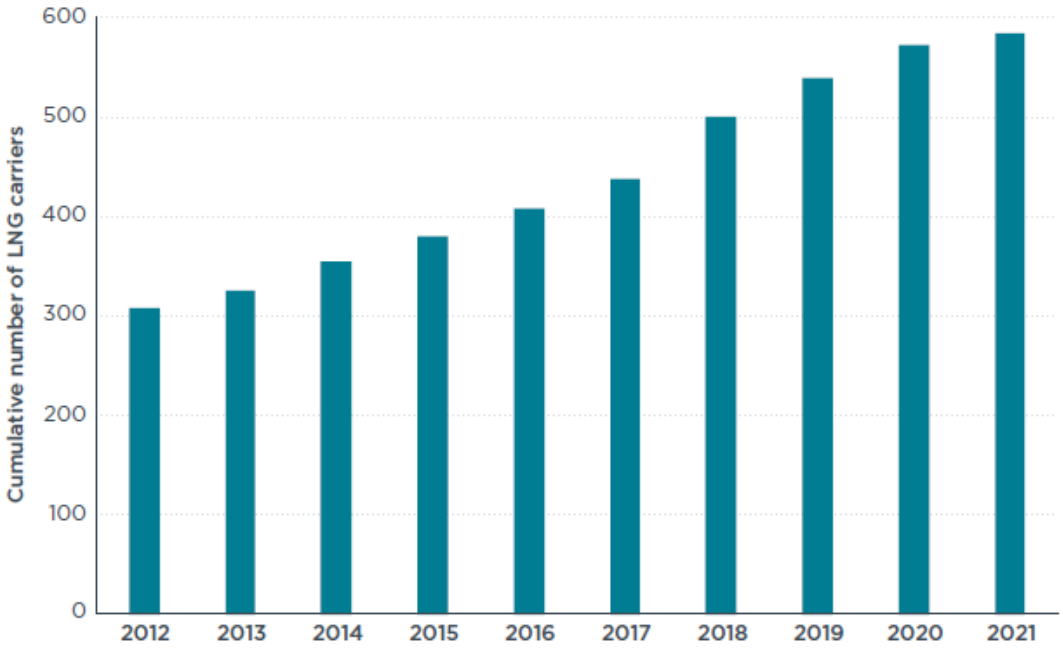
Το ΥΦΑ αποτελείται κυρίως από μεθάνιο. Σε μια χρονική περίοδο 20 ετών, το μεθάνιο παγιδεύει 86 φορές περισσότερη θερμότητα από την ίδια ποσότητα CO2. Αν διαφεύγει έστω και μικρή ποσότητα μεθανίου οπουδήποτε κατά τη διαδικασία εξαγωγής του από τη γη και καύσης του σε έναν κινητήρα, η χρήση ΥΦΑ θα μπορούσε να εκπέμπει περισσότερα αέρια θερμοκηπίου κατά τον **κύκλο ζωής** του από τα συμβατικά καύσιμα. Ως εκ τούτου αξιολογώντας τις κλιματικές επιπτώσεις της χρήσης ΥΦΑ ως καυσίμου πλοίων, απαιτείται σύγκριση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά το συνολικό κύκλο ζωής του ΥΦΑ σε σχέση με εκείνες των συμβατικών ναυτιλιακών καυσίμων.

Το ΥΦΑ αντιπροσώπευε λιγότερο από το 3% της κατανάλωσης καυσίμου πλοίων κατά τα έτη 2013 έως 2015, αλλά σήμερα περισσότερα πλοία από ποτέ χρησιμοποιούν ΥΦΑ. Το 2019, υπήρχαν 756 πλοία που κινούνταν με ΥΦΑ, εκ των οποίων 539 ήταν μεταφορείς ΥΦΑ από 355 πλοία πρωτύτερα, συμπεριλαμβανομένων 309 πλοίων ΥΦΑ το 2012. Όπως φαίνεται στην εικόνα 55, ο αριθμός των πλοίων κάθε είδους με καύσιμο ΥΦΑ έχει αυξηθεί σταθερά την τελευταία δεκαετία, ιδιαίτερα στους τομείς των πορθμείων, υπεράκτιων εγκαταστάσεων , δεξαμενόπλοιων και εμπορευματοκιβωτίων. Κατασκευάζονται επίσης νέα κρουαζιερόπλοια με κινητήρες ΥΦΑ.



Εικόνα 55: *Συνολικός αριθμός πλοίων που χρησιμοποιούν ΥΦΑ ως καύσιμο ΕΚΤΟΣ των μεταφορέων ΥΦΑ.*

Επιπλέον, οι μεταφορείς ΥΦΑ, που χρησιμοποιούν το φορτίο τους ως καύσιμο, συνεχίζουν να κατασκευάζονται καθώς η παγκόσμια ζήτηση για ΥΦΑ αυξάνεται (βλ. εικόνα 56).



Εικόνα 56: *Συνολικός αριθμός πλοίων μεταφοράς ΥΦΑ.*

Το ΥΦΑ ως καύσιμο όπως έχει προαναφερθεί, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενός πλοίου, επιτυγχάνοντας μείωση:

• Έως και 23% στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου
• Έως και 80% μείωση των εκπομπών NOX
• Σχεδόν εξαλείφει το SOx και τα σωματίδια (PM)

Οι εκπομπές NOx μειώνονται κατά 20-80%, ανάλογα με την τεχνολογία του κινητήρα ενώ με τη χρήση συστημάτων EGR (Exhaust Gas Recirculation) ή SCR (Selective Catalytic Reactor) μπορούν να επιτευχθούν επίπεδα NOx Tier III για όλους τους τύπους κινητήρων. Οι εκπομπές σωματιδίων μειώνονται επίσης δραστικά.Όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το CO2 όσο και το CH4 (μεθάνιο), το επίπεδο μείωσης εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα που επιλέγεται.

Αυτές οι χαμηλές εκπομπές οξειδίου του θείου (SOx) και NOx καθιστούν το ΥΦΑ ένα ελκυστικό καύσιμο για πλοία που επιχειρούν σε Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECAs, SECAs), όπου τα πλοία πρέπει να συμμορφώνεται με πιο αυστηρά πρότυπα ποιότητας του αέρα.

Το ΥΦΑ είναι φθηνότερο από το πετρέλαιο diesel -MGO ενώ σε ορισμένες περιοχές είναι φθηνότερο και από το βαρύ μαζούτ (HFO). Επιπλέον, για συμμόρφωση με τις εκπομπές θείου που είχε θεσπίσει ο IMO κατά το 2020 , τα πλοία πρέπει είτε να αλλάξουν από βαρύ μαζούτ HFO σε πιο ακριβό μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (VLSFO) ή χρήση μαζούτ HFO με σύστημα πλύσης καυσαερίων (scrubber) , εάν είναι εγκατεστημένο. Ωστόσο, η χρήση scrubbers υπόκειται σε πολύ έντονη αξιολόγηση κι έλεγχο των ρυθμιστικών διατάξεων, λόγω ανησυχιών τόσο για την αξιοπιστία αυτών των συστημάτων παροχής συνεπούς συμμόρφωσης με την ατμοσφαιρική ρύπανση αλλά και λόγω της ρύπανσης του θαλασσινού νερού που παράγεται από συστήματα ανοιχτού βρόχου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού τόσο των εθνικών, όσο και τοπικών περιφερειών οι οποίες απαγόρευσαν τη χρήση συστημάτων πλύσης καυσαερίων ανοιχτού βρόχου. Παραδείγματα τέτοιων αποφάσεων αποτελούν η Μαλαισία, η Κίνα, η Σιγκαπούρη καθώς και το λιμάνι της

Fujairah, η Διώρυγα του Παναμά. Η Καλιφόρνια δεν επιτρέπει τη χρήση όλων των συστημάτων πλύσης καυσαερίων —ανοικτού ή κλειστού βρόχου— λόγω στοιχείων που υποδηλώνουν ότι τα συστήματα αυτά ενδέχεται να μην έχουν ισοδύναμο αποτέλεσμα μείωσης εκπομπών σε σχέση με συμβατά καύσιμα Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (ECAs).

Αρκετές περιφερειακές και παγκόσμιες κανονιστικές εξελίξεις βοηθούν στην εξήγηση της πρόσφατης αύξησης του ενδιαφέροντος για το ΥΦΑ ως καύσιμο πλοίων. Αυτές περιλαμβάνουν αυστηρότερους κανονισμούς για την ατμοσφαιρική ρύπανση, την αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργεια, την προστασία της Αρκτικής καθώς και γενικότερα θέματα που σχετίζονται με το κλίμα.

Εκτός από τα παγκόσμια όρια περιεκτικότητας θείου στα καύσιμα, αυστηρότεροι κανονισμοί για την ατμοσφαιρική ρύπανση για τη ναυτιλία έχουν θεσπιστεί σε τέσσερις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών ECA (Emission Control Area) από τον IMO: τη Βαλτική Θάλασσα, τη Βόρεια Θάλασσα, τη Βόρεια Αμερική (Ηνωμένες Πολιτείες και Καναδάς με εξαιρέσεις ορισμένες πολικές περιοχές) και την Καραϊβική των ΗΠΑ. Το ΥΦΑ έχει πιστοποιηθεί ως βασική τεχνολογία συμμόρφωσης για τη μείωση των SOx, απαίτηση η οποία ρυθμίζεται μέσω της ποιότητας του καυσίμου και NOx τα οποία μειώνονται μέσω της βελτίωσης της καύσης στον κινητήρα ή δευτερογενώς με επεξεργασία των καυσαερίων. Ειδικότερα, η ECA της Βαλτικής Θάλασσας υποστηρίζεται από ένα νορβηγικό "ταμείο NOx" που επιτρέπει σε εταιρείες που πραγματοποιούν επενδύσεις σε τεχνολογίες μείωσης των NOx την αποφυγή φορολογίας. Το ΥΦΑ ήταν η κύρια τεχνολογία διεκδίκησης κι απορρόφησης επενδύσεων στο πλαίσιο του ταμείου NOx. Σημαντικό να αναφερθεί ότι συχνά οι κινητήρες φαίνεται να είναι ρυθμισμένοι έτσι ώστε να εκπέμπουν πολύ χαμηλά οξείδια του αζώτου, πολύ κάτω από το όριο που ορίζουν τα πρότυπα με αποτέλεσμα αυτή η υπέρβαση, η οποία απαιτεί πιο αδύνατα μείγματα, να αυξάνει τις διαφυγές μεθανίου κατά την καύση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι κινητήρες να μπορούν να εκπέμπουν είτε χαμηλά NOx ή να έχουν χαμηλές διαφυγές/εκπομπές μεθανίου, αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα.

Οι κανονισμοί του IMO για τον Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) απαιτούν από τα νέα πλοία να είναι λιγότερο ρυπογόνα ως προς τον άνθρακα με την πάροδο του χρόνου. Το EEDI ρυθμίζει την ποσότητα CO2 που μπορεί να εκπέμπεται για τη μετακίνηση αγαθών ή ανθρώπων σε δεδομένη απόσταση. Επειδή το EEDI προς το παρόν ρυθμίζει μόνο το CO2, οι πλοιοκτήτες που αγοράζουν πλοία με καύσιμο ΥΦΑ, συμμορφώνονται ευκολότερα με τα πρότυπα εκπομπών. Αυτό συμβαίνει επειδή το ΥΦΑ εκπέμπει περίπου 25% λιγότερο CO2 από τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα παρέχοντας την ίδια ποσότητα ισχύος πρόωσης. Μέχρι να ρυθμίσει ο IMO τα αέρια θερμοκηπίου GHG, όπως έχει επισημάνει ότι θα κάνει στο πλαίσιο της αρχικής στρατηγικής GHG, το ΥΦΑ θα παραμείνει ένας αποτελεσματικός τρόπος για τους πλοιοκτήτες να πληρούν τα πρότυπα.

Το EEDI ισχύει για νέα πλοία, αλλά ο IMO εργάζεται επίσης για τη ρύθμιση των αερίων του θερμοκηπίου και για τον υπάρχον στόλο γεγονός που έχει εγείρει ανησυχίες σχετικά με τη βιωσιμότητα των επενδύσεων, ειδικότερα των πρόσφατων. Επιπλέον, η επένδυση σε υποδομές ΥΦΑ σε πλοία και στην ξηρά μπορεί να καταστήσει πιο δύσκολη τη μετάβαση σε καύσιμα χαμηλών ή και μηδενικών εκπομπών άνθρακα στο μέλλον.

Ένας άλλος μοχλός των επενδύσεων ΥΦΑ μπορεί να είναι οι προσπάθειες προστασίας της Αρκτικής. Η υπερθέρμανση της γης καθιστά μεγαλύτερες εκτάσεις της Αρκτικής προσιτές στην υπερπόντια ναυτιλία . Αυτό με τη σειρά του, οδηγεί σε ετήσια αύξηση της κυκλοφορίας κατά μήκος της διαδρομής του Βόρειου Περάσματος όπως αποκαλείται (Ρωσικά «νερά») και σε μικρότερο βαθμό, το Βορειοδυτικό Πέρασμα (Καναδικά «νερά»). Η ναυτιλία και η αλιεία αποτελούν ήδη μια σημαντική πηγή μαύρου άνθρακα (BC/black Carbon) στην Αρκτική γεγονός που αυξάνει την ανησυχία των κυβερνήσεων και της κοινωνίας των πολιτών για τις οικολογικές και κλιματικές επιπτώσεις της αύξησης της ναυτιλίας στην Αρκτική, τόσο για τις ανθρακικές εκπομπές όσο και από τον κίνδυνο διαρροής μαζούτ HFO.

Σε απάντηση, ο ΙΜΟ ζήτησε προτάσεις για τη ρύθμιση των εκπομπών άνθρακα καθώς και συμφώνησε στην απαγόρευση χρήσης και μεταφοράς μαζούτ-HFO ως καυσίμου στην Αρκτική. Αυτή η απαγόρευση θα μπορεί θα τεθεί σε ισχύ έως το 2023 ενώ η χρήση του ΥΦΑ θε επιτρέψει τη συμμόρφωση και με τις δύο κανονιστικές απαιτήσεις.

Οι ανησυχίες για το κλίμα φαίνεται επίσης να κεντρίζουν το ενδιαφέρον για τη χρήση ΥΦΑ. Ενώ η διεθνής ναυτιλία δεν περιλαμβάνεται ρητά στη Συμφωνία του Παρισιού, τα Μέρη που την επικυρώνουν συμφώνησαν ότι όλοι οι τομείς θα πρέπει να καταβάλουν προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου GHG για τον περιορισμό της υπερθέρμανσης που προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες χαμηλότερα από τους 2°C, με στόχο τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας όχι παραπάνω από 1,5°C. Αυτή η αρχή ώθησε στη συνέχεια τον ΙΜΟ να αναπτύξει τη δική του στρατηγική για το κλίμα.
Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να καθιερωθεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση των αερίων θερμοκηπίου GHG του κύκλου ζωής, εκπομπές που προκύπτουν από τη χρήση ΥΦΑ ως καυσίμου πλοίων πριν από σημαντικές επενδύσεις τόσο σε από κατασκευή υποδομές ΥΦΑ όσο και νέες κατασκευές.

Η αρχική στρατηγική του ΙΜΟ για τα αέρια θερμοκηπίου που συμφωνήθηκε τον Απρίλιο του 2018, στοχεύει στη θέσπιση ανώτατου ορίου εκπομπών αερίων θερμοκηπίου GHG το συντομότερο δυνατόν, έτσι ώστε να μειωθούν οι ανθρακικές εκπομπές από τη ναυτιλία κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008, καθώς και μείωση των απόλυτων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα επίπεδα του 2008 κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050, εξαλείφοντας τα αέρια του θερμοκηπίου από τον κλάδο το συντομότερο δυνατό, έτσι ώστε να ευθυγραμμιστεί με τους στόχους της θερμοκρασιακής αύξησης της Συμφωνίας του Παρισιού (International Maritime Οργανισμός [IMO], 2018). Αυτό συνεπάγεται μείωση τουλάχιστον 70% των εκπομπών από τις συνήθεις ναυτιλιακές δραστηριότητες κατά το 2050 .

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του προγράμματος «Fit for 55», αποσκοπεί να διαμορφώσει του κανόνες της απανθράκωσης εντός της ΕΕ , με στόχο να επιτευχθεί μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030.

Το ΥΦΑ θεωρείται από ορισμένους ως βασικό μεταβατικό καύσιμο για την επίτευξη αυτών των στόχων. Ωστόσο, υπάρχει διαρροή μεθανίου τόσο «πρωτογενώς» κατά την παραγωγική διαδικασία και διαχείριση του ΥΦΑ όσο και διαφυγή μεθανίου κατά την καύση του που πρέπει να εξεταστεί.

4.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΦΥΓΟΝΤΟΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ

Μια συνολική θεώρηση των εκπομπών αερίων ρύπων κατά τον κύκλο ζωής του ΥΦΑ σε σχέση με MGO, VLSFO και HFO όταν χρησιμοποιείται σε κινητήρες κατάλληλους για διεθνή ναυτιλία θα πρέπει να περιλαμβάνει τις εκπομπές «παραγωγής» του ΥΦΑ καθώς και αυτές της καύσης και τις διαφυγές άκαυστου μεθανίου (methane slip) αξιολογώντας τις κλιματικές επιπτώσεις της υπερθέρμανσης που θα προκληθεί σε ορίζοντα GWP 100 και 20 ετών. Σήμερα σχεδόν όλες οι τεχνολογίες κινητήρων πλοίων μπορούν να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ως καύσιμο. Μεταξύ αυτών μπορούν ν' αναφερθούν οι:

- ατμοστρόβιλοι
- τετράχρονοι, μεσόστροφοι κινητήρες αμιγώς αερίου που χρησιμοποιούν σπινθηριστή για ανάφλεξη του μίγματος
- τετράχρονοι, μεσόστροφοι κινητήρες διπλού καυσίμου με έγχυση χαμηλής πίεσης (LPDF)
- δίχρονοι, αργόστροφοι κινητήρες χαμηλής πίεσης LPDF
- δίχρονοι, αργόστροφοι κινητήρες υψηλής πίεσης LPDF (HPDF)
- αεριοστρόβιλοι

Κάθε μία από αυτές τις παραπάνω τεχνολογίες κινητήρα εκπέμπει άκαυστο μεθάνιο. Το άκαυστο μεθάνιο προέρχεται κυρίως από ατελή καύση και καύσιμο που καταλαμβάνει τους υπό-θύλακες του θαλάμου καύσης κατά τη συμπίεση. Επιπλέον φτωχά μείγματα που εγχύονται σε χαμηλή πίεση οδηγούν σε μεγαλύτερη (άκαυστη) διαφυγή μεθανίου σε σύγκριση με συστήματα/μηχανές έγχυσης αερίου υψηλής πίεσης.

Στην εικόνα 57 παρατίθεται η τεχνολογία του κινητήρα, ο τύπος του πλοίου στον οποίο χρησιμοποιείται καθώς και ο αριθμός των εν λόγω πλοίων, ως επίσης η θερμική απόδοση και η ποσότητα του διαφυγόντος μεθανίου κατά τη διάρκεια της καύσης. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η μείωση του άκαυστου μεθανίου αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας κι εξέλιξης, εξαιτίας τόσο της ανακοίνωσης εφαρμογής του κανονιστικού πλαισίου αλλά και της ευαισθητοποίησης των παραγόντων του ναυτιλιακού χώρου γενικότερα.

Engine type[a]	Example ship types (and engines)	Ships in operation and on order as of mid-2018[b]	Year with the most installations[b]	Thermal efficiency when using LNG[c]	Methane slip (gCH_4/kWh)
LBSI, medium-speed	Car/passenger ferries mostly (e.g., Rolls-Royce/ Bergen C26:33L9PG), offshore supply vessels (OSVs), a few general cargo, tugs, and roro vessels	At least 45	2014	48%	4.1
LPDF, medium-speed, four-stroke	LNG carriers mostly (e.g., Wärtsilä 12V50DF) with some OSVs and car/ passenger ferries; also used for LNG-fueled cruise ships (e.g., MaK 16M46DF)	At least 300, including at least 13 cruise ships	2018	48%	5.5
LPDF, slow-speed, two-stroke	LNG carriers (e.g., Wärtsilä/ Winterthur Gas & Diesel (WinGD) 5X72DF) and mega container ships (e.g., Wärtsilä/WinGD 12X92DF). Also, some oil and chemical tankers	At least 50	2020	50%	2.5
HPDF, slow-speed, two-stroke	LNG carriers (e.g., MAN-B&W 5G70ME-C9-GI) as well as container ships and a few car carriers, general cargo carriers, and a bulk carrier	At least 90	2018	53%	0.2
Steam turbine	LNG carriers (e.g., Kawasaki UA-400)	At least 280	2006	28%	0.04
Gas turbine	High-speed ferries (e.g., GE LM2500)	At least 1	2013	37%	0.06

Εικόνα 57 : *Μηχανές ΥΦΑ, πλοία που χρησιμοποιούνται και δεδομένα διαφυγόντος μεθανίου*

Για την ανάλυση των εκπομπών αερίων ρύπων καυσίμων, χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα ένα εκ των οποίων είναι και το GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation) (αέρια θερμοκηπίου, ρυθμιζόμενες εκπομπές και Χρήση ενέργειας στις μεταφορές). Το GREET παρέχει ισχυρό σύνολο δεδομένων εκπομπών που σχετίζονται με την παραγωγή καυσίμων και τα χωρίζει σε διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής. Υπάρχει επίσης η επιλογή συμπλήρωσης με δεδομένα χρήστη για την αξιολόγηση της επίπτωσης διαφόρων υποθέσεων στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ενός καυσίμου, από την εξόρυξη μέχρι την καύση του για την παραγωγή ισχύος πρόωσης επί του πλοίου (Well-to-Wake,WtW). Το GREET χρησιμοποιείται ευρέως από κυβερνητικούς φορείς, βιομηχανίες και ακαδημαϊκό κόσμο επειδή είναι διαφανές, ευέλικτο και περιέχει δεδομένα υψηλής ποιότητας.

Ενώ οι εκπομπές επί του πλοίου (δηλαδή οι εκπομπές από τη δεξαμενή αποθήκευσης μέχρι την καύση και παραγωγή ισχύος επί του πλοίου,(Tank -To-Wake,TtW) του ΥΦΑ σε συγκεκριμένη μηχανή είναι σταθερές ανεξάρτητα από την πηγή προέλευσης του ΥΦΑ, αυτές

της παραγωγικής διαδικασίας (δηλαδή WtT) μπορεί να διαφέρουν ευρέως μεταξύ των πηγών εξόρυξης και διαχείρισης ΥΦΑ ενώ εξαρτώνται από την περιοχή εξόρυξης, τη διαδικασία εξόρυξης καθώς και την απόσταση μεταφοράς.

4.3.1 WtT, ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΥΦΑ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΚΙ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.

Για την αξιολόγηση και σύγκριση των εκπομπών αερίων ρύπων τόσο του ΥΦΑ όσο και των συμβατικών καυσίμων, λαμβάνονται υπόψιν τα δεδομένα και παραδοχές του GREET. Για το ΥΦΑ, το «GREET» θεωρεί ένα μείγμα συμβατικού (48%) και σχιστολιθικού αερίου (52%) που παράγονται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Για το πετρέλαιο, χρησιμοποιείται το προεπιλεγμένο μείγμα αργού «GREET» , το οποίο αποτελείται από αργό πετρέλαιο των ΗΠΑ (57%), το αργό καναδικό πετρέλαιο άμμου (10%), και συμβατικό καναδικό αργό πετρέλαιο (10%) ενώ το υπόλοιπο προέρχεται από τη Μέση Ανατολή, Αφρική και Λατινική Αμερική. Για το VLSFO, το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί από το GREET, υποθέτουμε σταθμισμένο μέσο όρο 20% HFO και 80% MGO για την προσέγγιση της αναλογίας ανάμειξης που απαιτείται για να πληρείται το παγκόσμιο όριο θείου 2020 του IMO που δεν υπερβαίνει το 0,50%.

Οι εκπομπές WtT από τα συμβατικά καύσιμα πλοίων συνοψίζονται στον πίνακα της εικόνας 58. Οι εκπομπές από τον κάθε τύπο καυσίμου αναλύονται με βάση τα τρία πρωτεύοντα στοιχεία των αερίων θερμοκηπίου (CH4, N2O, CO2) GHG, που αποδίδονται στη διαδικασία παραγωγής και στη συνέχεια αθροίζονται σε ισοδύναμο CO2e (equivalent). Το μαζούτ HFO έχει τις χαμηλότερες εκπομπές WtT επειδή απαιτεί λιγότερο υδρογόνο και μικρότερο ποσοστό ενέργειας κατά τη διαδικασία της διύλισης σε σχέση με τα άλλα, υψηλότερης ποιότητας, προϊόντα της διύλισης.

Το ΥΦΑ έχει υψηλότερες εκπομπές WtT από τα συμβατικά καύσιμα λόγω των υψηλότερων εκπομπών μεθανίου κατά τη διαδικασία «παραγωγής». Οι εκπομπές αυτές λαμβάνουν χώρα κυρίως κατά την εξόρυξη λόγω διαρροής, την επεξεργασία και τη μεταφορά του ΥΦΑ. Η φάση της υγροποίησης αυξάνει επίσης την καταναλισκόμενη ενέργεια και τις εκπομπές που αποδίδονται στην παραγωγή ΥΦΑ, ενώ αυξάνει τις εκπομπές του σε σχέση με το φυσικό αέριο που παρέχεται μέσω αγωγών.

	HFO	VLSFO	MGO	LNG
CH_4	0.1	0.1	0.1	0.3
N_2O	0.0	0.0	0.0	0.0
CO_2	10.7	12.9	13.5	11.0
CO_2e (100-year)	**14.3**	**16.8**	**17.4**	**21.5**
CO_2e (20-year)	**19.2**	**22.0**	**22.7**	**35.6**

Source: GREET (2018)
Note: GWP values from IPCC AR5 (IPCC, 2013)

Εικόνα 58: WtT, *εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία παραγωγής διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων σε gr/MJ (grams/megajoule)*

4.3.2 TtW, ΕΚΠΟΜΠΕΣ «ΕΠΙ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ» ΑΠΟ ΤΟ ΥΦΑ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

Οι **TtW** tank-to-wake εκπομπές, αντιπροσωπεύουν τις εκπομπές που σχετίζονται με την καύση των καυσίμων σε δεδομένο κινητήρα και ο πίνακας της εικόνας 59 περιγράφει λεπτομερώς αυτές τις εκπομπές καύσης ανά τύπο καυσίμου. Οι εκπομπές CO2 της καύσης από το GREET είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα κάθε καυσίμου, εκτός από το VLSFO, για το οποίο το υπολογίζουμε ως αναλογία HFO και MGO 20:80, και για κάθε

καύσιμο ένα μέρος του άνθρακα εκπέμπεται ως πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs,volatile organic compound) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η καύση ΥΦΑ παράγει τη χαμηλότερη ποσότητα CO2 ανά MJ , ενώ αντίθετα το μαζούτ HFO έχει τις υψηλότερες εκπομπές κατά την καύση. Η καύση ορυκτών καυσίμων εκπέμπει επίσης μικρές ποσότητες οξειδίου του αζώτου (N2O) και μεθανίου (CH4), τα οποία και τα δύο είναι ισχυροί επιβαρυντικοί παράγοντες για το κλίμα. Οι ποσότητες του CH4 στον Πίνακα της εικόνας 59 αντιπροσωπεύουν εκπομπές μόνο της καύσης. Η διαφυγή μεθανίου είναι μια ξεχωριστή και πρόσθετη πηγή εκπομπών μεθανίου κι έχει παρατεθεί στην εικόνα 57.

	HFO	VLSFO	MGO	LNG
CH_4	$7.5x10^{-4}$	$7.4x10^{-4}$	$7.5x10^{-4}$	$1.8x10^{-2}$
N_2O	$3.9x10^{-3}$	$3.8x10^{-3}$	$3.9x10^{-3}$	$1.6x10^{-3}$
CO_2	80.1	75.6	73.6	56.5
CO_2e (100-year)	**81.2**	**76.6**	**74.7**	**57.5**
CO_2e (20-year)	**81.2**	**76.7**	**74.7**	**58.4**

Source: GREET (2018)
Note: GWP values from IPCC AR5 (IPCC 2013)

Εικόνα 59: *TtW, εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία της καύσης διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων σε gr/MJ (grams/megajoule)*

Ο πίνακας της εικόνας 60 περιέχει την ειδική κατανάλωση καυσίμου για τους κινητήρες που αναλύθηκαν. Οι τιμές των γραμμαρίων ανά κιλοβατώρα (g/kWh) ειδικής κατανάλωσης καυσίμου που αναφέρεται από την κατασκευάστρια εταιρία των κινητήρων έχουν μετατραπεί στον πίνακα σε MJ ανά kWh παραγόμενης ενέργειας.

Συγκεκριμένα οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου ΥΦΑ και MGO έχουν ληφθεί από τους εξής κατασκευαστές κινητήρων: για LPDF, μεσόστροφου, τετράχρονου (Wärtsilä, 2019) για LPDF, έκδοση τετράχρονου μεσόστροφου (Caterpillar, 2016), για LPDF, αργόστροφου, δίχρονου (WinGD, 2019), για HPDF, αργόστροφου, δίχρονου (MAN Energy, 2018), για ντίζελ αργόστροφου, δίχρονο (MAN Energy Solutions, 2017) και για ντίζελ μεσόστροφου, τετράχρονο (Wärtsilä, 2019). Η ειδική κατανάλωση καυσίμου βασίζεται σε θερμογόνο δύναμη: 40 MJ/kg για HFO, 41,8 MJ/kg για το VLSFO, 42,7 MJ/kg για το MGO και 50 MJ/kg για το ΥΦΑ. Για το μαζούτ HFO, υποτίθεται ότι το καύσιμο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με ένα σύστημα πλύσης καυσαερίων, κάτι που απαιτεί πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας 2% ανά kWh παραγόμενης ενέργειας. Οι αργόστροφοι κινητήρες LPDF, και HPDF απαιτούν μικρή ποσότητα MGO πιλοτικό καύσιμο.

Engine type	SFC	HFO[a]	VLSFO	MGO	LNG
LPDF, medium-speed, four-stroke	g/kWh	201	188	184	149
	equivalent MJ/kWh	8.03	7.87	7.87	7.45
LPDF, medium-speed, four-stroke, cruise ship version	g/kWh	199	187	183	147
	equivalent MJ/kWh	7.97	7.81	7.81	7.37
LPDF, slow-speed, two-stroke	g/kWh	198	186	182	142.3[b]
	equivalent MJ/kWh	7.94	7.78	7.78	7.12[b]
HPDF, slow-speed, two-stroke	g/kWh	177	167	163	130.7[c]
	equivalent MJ/kWh	7.10	6.96	6.96	6.54[c]
Slow-speed diesel, two-stroke	g/kWh	180	169	165	N/A
	equivalent MJ/kWh	7.19	7.05	7.05	N/A
Medium-speed diesel four-stroke	g/kWh	188	176	173	N/A
	equivalent MJ/kWh	7.52	7.37	7.37	N/A

[a] Includes a 2% energy consumption penalty for using scrubbers
[b] Requires an additional 0.8 g/kWh (0.034 MJ/kWh) of MGO pilot fuel
[c] Requires an additional 6.1 g/kWh (0.26 MJ/kWh) of MGO pilot fuel

Εικόνα 60: *Ειδική κατανάλωση ανά τύπο καυσίμου για τις εξεταζόμενες μηχανές*

Οι συντελεστές εκπομπών CO2e/kWh 100 ετών και 20 ετών για κάθε ζεύγος κινητήρα-καυσίμου υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την ειδική κατανάλωση καυσίμου που αναφέρεται στον Πίνακα της εικόνας 60 επί τους ειδικούς για το καύσιμο συντελεστές εκπομπής CO2e στον Πίνακα 59. Στη συνέχεια προστίθεται το ποσό του διαφυγόντος μεθανίου από τον Πίνακα εικόνας 57, υποθέτοντας GWP 100 ετών για μεθάνιο 36 και 20 ετών GWP 86. Το αποτέλεσμα είναι οι συνολικές εκπομπές GHG του κύκλου ζωής για κάθε ζεύγος κινητήρα-καυσίμου.

4.3.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας τα παραπάνω θα παραθέσουμε ανάλυση των εκπομπών ζωής αερίων του θερμοκηπίου του κύκλου ζωής, για κινητήρες που ενδείκνυνται για την παγκόσμια ναυτιλία. Η ανάλυση περιλαμβάνει τη σύγκριση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου GHG του κύκλου ζωής από κινητήρες διπλού καυσίμου που χρησιμοποιούν ΥΦΑ καθώς και συμβατικά καύσιμα. Περαιτέρω αξιολογούνται οι εκπομπές GHG κύκλου ζωής , από κινητήρες ντίζελ αργόστροφους που χρησιμοποιούνται ευρέως στην υπερπόντια εμπορική ναυτιλία (διεθνής ναυτιλία) καθώς και μεσόστροφοι κινητήρες ντίζελ οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην επιβατηγό Ναυτιλία.

Οι περισσότερες αξιολογήσεις κύκλου ζωής χρησιμοποιούν GWP (global warming potential) 100 ετών. Στην παρούσα ανάλυση εξετάζονται και οι βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις της χρήσης ΥΦΑ.

Το μεθάνιο έχει διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα μόνο 12,4 χρόνια — μικρό ποσοστό της διάρκειας ζωής του CO2—αλλά έχει πολύ μεγαλύτερο αντίκτυπο στο κλίμα βραχυπρόθεσμα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η 20ετής επίδραση του GWP, το οποίο αξιολογεί την κλιματική επιβολή ο αντίκτυπος των GHG σε ένα χρονοδιάγραμμα 20 ετών, για το μεθάνιο είναι 83. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον αριθμό, υπερδιπλασιάζεται η επίδραση του ΥΦΑ στο κλίμα.

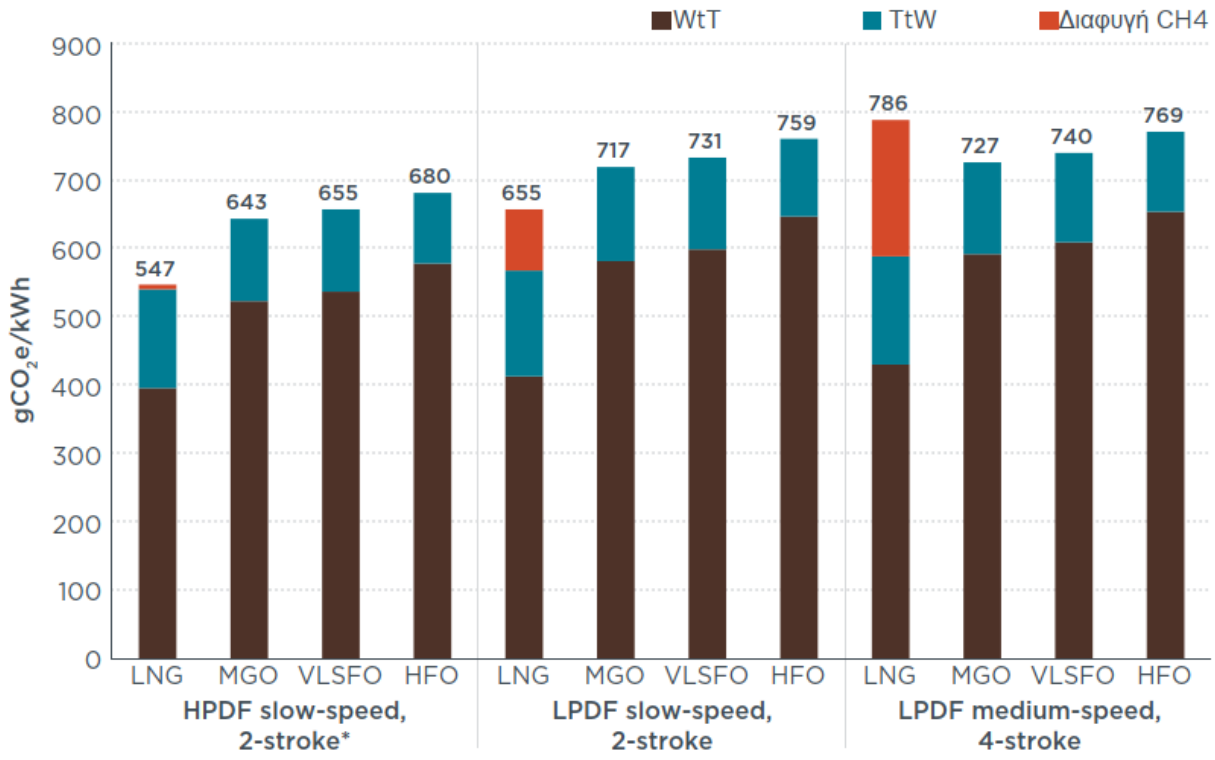
Για αυτούς τους λόγους, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και ομαδοποιούνται σε δύο σενάρια μακροπρόθεσμων (100 ετών) και των βραχυπρόθεσμων Κλιματικών επιπτώσεων (20 ετών) :

1. GWP 100 ετών
2. GWP 20 ετών

Το κάθε σενάριο λαμβάνει υπόψιν τις εκπομπές ΑΘ-GHG κύκλου ζωής χρησιμοποιώντας ΥΦΑ και συμβατικά καύσιμα πλοίων, εξετάζοντας 3 κατηγορίες κινητήρων που είναι κατάλληλοι για διεθνή ναυτιλία, συμπεριλαμβανομένων κι αυτών που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην επιβατηγό ναυτιλία:

1. 2-ΧΡΟΝΟΣ αργόστροφος, υψηλής πίεσης,HPDF, 2STR
2. 2-ΧΡΟΝΟΣ αργόστροφος, χαμηλής πίεσης,LPDF,2STR
3. 4-ΧΡΟΝΟΣ, μεσόστροφους χαμηλής πίεσης,LPDF,4STR

Όπως φαίνεται στην εικόνα 61, λαμβάνοντας υπόψιν τις εκπομπές της «παραγωγής» (μπλε ράβδοι) καθώς και της καύσης (καφέ ράβδοι) και αγνοώντας αυτές της διαφυγής μεθανίου, χρήση ΥΦΑ σε κινητήρες διπλού καυσίμου θα προκαλούσε εξοικονόμηση εκπομπών κατά τον κύκλο ζωής μεταξύ 16% και 21% σε σχέση με το MGO σε χρονοδιάγραμμα 100 ετών. Όταν προσθέτουμε τη διαφυγή μεθανίου (πορτοκαλί ράβδοι), αυτές οι εξοικονομήσεις μειώνονται δραστικά ή εξαφανίζονται στην περίπτωση των 4χρονων μηχανών διπλού καυσίμου. Λαμβάνοντας υπόψη ένα χρονικό πλαίσιο 100 ετών, οι κινητήρες HPDF που χρησιμοποιούν ΥΦΑ εκπέμπουν 15% λιγότερα αέρια θερμοκηπίου GHG κατά τον κύκλο ζωής τους σε σύγκριση με χρήση MGO και σε σύγκριση με ένα ντίζελ χαμηλής ταχύτητας (SSD) που μπορεί να χρησιμοποιεί μόνο MGO. Οι LPDF αργόστροφοι, δίχρονοι κινητήρες εκπέμπουν περίπου 9% λιγότερα αέρια θερμοκηπίου GHG κύκλου ζωής από το MGO όταν χρησιμοποιούν ΥΦΑ. Οι μεσόστροφοι 4-χρονοι κινητήρες LPDF, εκπέμπουν 8% περισσότερα GHG κύκλου ζωής όταν χρησιμοποιούν ΥΦΑ αντί MGO και 16% περισσότερο σε σύγκριση με ένα 4χρονο ντίζελ μεσαίας ταχύτητας (MSD) που χρησιμοποιεί MGO, όπως φαίνεται στην εικόνα 61.

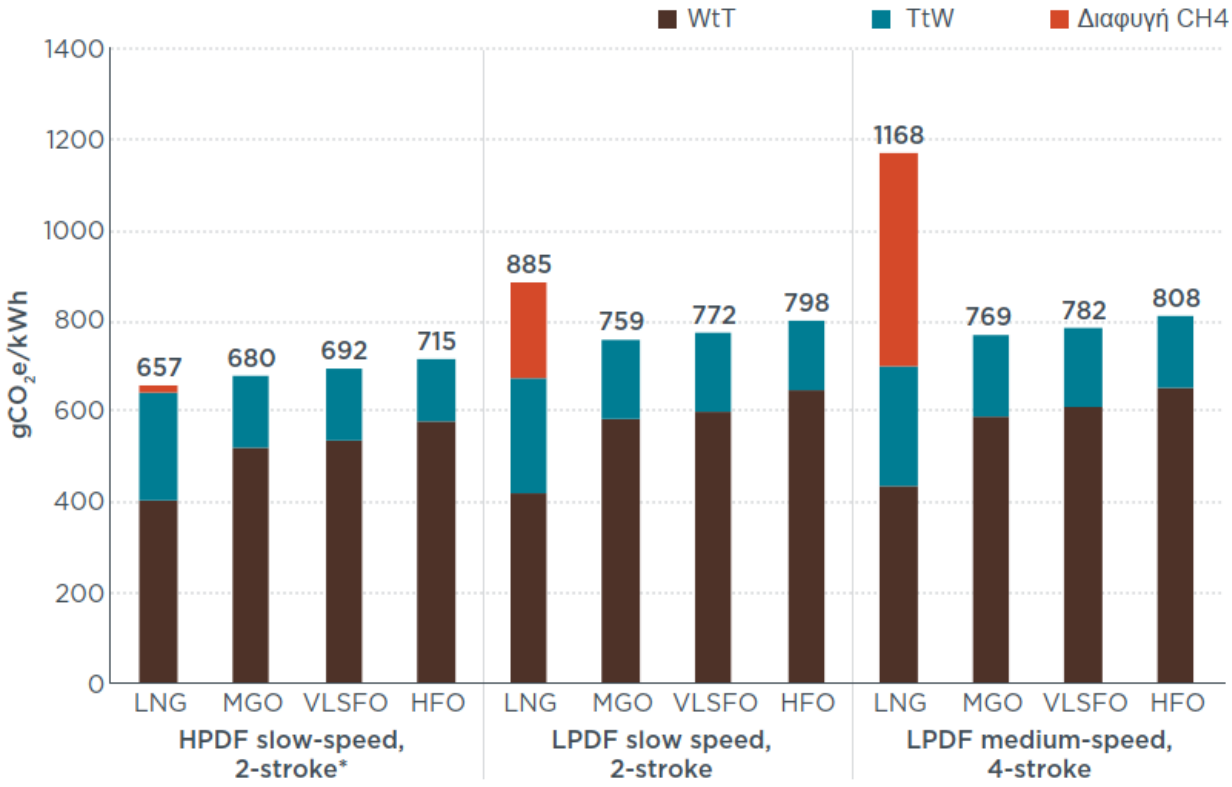


Εικόνα 61: εκπομπές κύκλου ζωής ανά τύπο μηχανής και καύσιμο για ορίζοντα 100 ετών

Χρησιμοποιώντας GWP 20 ετών -βλ. πίνακα εικόνας 62-, ο μοναδικός τύπος κινητήρα που έχει χαμηλότερες εκπομπές ρύπων κατά τη διάρκεια ζωής με χρήση ΥΦΑ είναι ο HPDF και εδώ η εξοικονόμηση εκπομπών είναι σχετικά μικρή: 3% χαμηλότερη από όταν χρησιμοποιεί MGO (καθώς και σε σύγκριση με κινητήρα SSD που χρησιμοποιεί MGO). Χρήση ΥΦΑ σε οποιοδήποτε κινητήρα χαμηλής πίεσης LPDF έχει ως αποτέλεσμα πολύ υψηλότερες εκπομπές του κύκλου ζωής, σε 20ετή βάση:

- 17% υψηλότερο από τη χρήση MGO για LPDF αργόστροφο 2-χρονο κινητήρα, και
- 52% υψηλότερο από τη χρήση MGO για LPDF μεσόστροφο 4-χρονο κινητήρα.

Η χρήση LPDF χαμηλής πίεσης , δίχρονης μηχανής με ΥΦΑ εκπέμπει 30% περισσότερες εκπομπές GHG κύκλου ζωής από έναν δίχρονο κινητήρα diesel SSD που χρησιμοποιεί MGO. Ένας LPDF μεσόστροφος, τετράχρονος κινητήρας εκπέμπει 62% περισσότερες εκπομπές GHG κύκλου ζωής από ένα MSD που χρησιμοποιεί MGO.



Εικόνα 62: εκπομπές κύκλου ζωής ανά τύπο μηχανής και καύσιμο για ορίζοντα 20 ετών

4.4 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΦΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Η παράθεση και ανάλυση των αποτελεσμάτων καταδεικνύει αρχικά τη μεγάλη σημασία της επιλογής του χρονικού ορίζοντα της αξιολόγησης (επιλογή του GWP 100-ετών ή 20-ετών) και των υποθέσεων σχετικά με τις εκπομπές που εκλύονται κατά την «παραγωγική» διαδικασία (WtT) και την διαφυγή (TtW) του μεθανίου κατά τη διαδικασία της χρήσης/καύσης σε Μ.Ε.Κ.

Πρόσφατες αναλύσεις (Thinkstep -2019) και το Lindstand 2019) έχουν εξετάσει τις επιπτώσεις GHG στον κύκλο ζωής της χρήσης ΥΦΑ σε σχέση με συμβατικά καύσιμα πλοίων. Υπάρχουν διαφορές στις βασικές παραμέτρους μεταξύ των διαφόρων μελετών οι οποίες έχουν προσεγγίσει το θέμα της αξιολόγησης των εκπομπών του ΥΦΑ σε σχέση με τα υπάρχοντα ναυτιλιακά καύσιμα οι οποίες θα παρατεθούν στη συνέχεια.

Ενώ όλες οι μελέτες εξετάζουν τα 100ετή και 20ετή GWP, κάποιες εστιάζουν σε σενάρια GWP 100 ετών και περιλαμβάνουν το 20ετές GWP μόνο για ανάλυση ευαισθησίας, ή γιατί το 20ετές GWP αντικατοπτρίζει καλύτερα την επείγουσα ανάγκη μείωσης των εκπομπών GHG, κάτι που υιοθετεί κι ο IMO.

Χρησιμοποιώντας ένα GWP 100 ετών και υποθέτοντας ότι τόσο η διαρροή μεθανίου κατά την "παραγωγική" διαδικασία (WtT) όσο και η διαφυγή μεθανίου κατά την καύση είναι καλά ελεγχόμενες, διαπιστώθηκε ότι οι 2-χρονοι, αργόστροφοι κινητήρες HPDF και LPDF εκπέμπουν λιγότερα αέρια θερμοκηπίου GHG κατά το συνολικό κύκλο ζωής, όταν χρησιμοποιούν ΥΦΑ σε σχέση με τη χρήση συμβατικών υγρών καυσίμων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη μεγάλη ισχύ των εν λόγω κινητήρων και τον αριθμό των πλοίων που ήδη τους χρησιμοποιούν καταδεικνύει τη θετική επίπτωση της χρήσης του ΥΦΑ στη ναυτιλία.

Αναφορικά με τους μεσόστροφους 4-χρονους κινητήρες LPDF που χρησιμοποιούνται σε τουλάχιστον 300 πλοία, συμπεριλαμβανομένου μεταφορείς ΥΦΑ, πλοία εφοδιασμού υπεράκτιων εγκαταστάσεων , οχηματαγωγά και επιβατηγά πλοία και κρουαζιερόπλοια, βρέθηκε ότι εκπέμπουν περισσότερα GHG του κύκλου ζωής όταν χρησιμοποιούν ΥΦΑ από τα συμβατικά καύσιμα.

Η διατήρηση του ορίου της αύξησης θέρμανσης του πλανήτη μέχρι 1,5°C απαιτεί οι ανθρωπογενείς εκπομπές μεθανίου να αρχίσουν να μειώνονται αμέσως και να είναι τουλάχιστον 35% κάτω από τα επίπεδα του 2010 έως το 2050. Δεδομένου ότι το μεθάνιο έχει ισχυρές επιπτώσεις στην υπερθέρμανση του πλανήτη, η χρήση GWP 20 ετών ευθυγραμμίζεται καλύτερα με την επείγουσα ανάγκη μείωσης των αερίων θερμοκηπίου GHGs. Αυτή η επείγουσα ανάγκη αντικατοπτρίζεται στην αρχική στρατηγική του IMO για τα GHG: «Ο IMO παραμένει δεσμευμένος στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία και για να καταδείξει το επείγον του θέματος, έχει στοχεύσει στην κατάργησή τους το συντομότερο δυνατό σε αυτόν τον αιώνα» (IMO, 2018, παράγραφος 2).

Χρησιμοποιώντας ένα GWP 20 ετών βρέθηκε ότι μόνο μία τεχνολογία κινητήρα, HPDF, παρέχει μειωμένες εκπομπές GHG κατά τον κύκλο ζωής κατά τη χρήση ΥΦΑ αντί για συμβατικά καύσιμα. Ακόμη και τότε, το όφελος ήταν 3% και μόνο εάν υπήρχαν καλά ελεγχόμενες εκπομπές "παραγωγικής" διαδικασίας (WtT). Δυστυχώς, οι καλά ελεγχόμενες εκπομπές μπορεί να μην ισχύουν, όπως συμβαίνει κατά την εξόρυξη του σχιστολιθικού αερίου, το οποίο απελευθερώνει περισσότερο μεθάνιο σε σχέση με άλλες πηγές φυσικού αερίου, γεγονός που οδηγεί σε υψηλότερες εκπομπές "παραγωγικής" διαδικασίας (WtT) από τις αναμενόμενες. Λαμβάνοντας υπόψιν υψηλότερες εκπομπές "παραγωγικής" διαδικασίας (WtT), ακόμη και οι κινητήρας HPDF εκπέμπουν περισσότερα αέρια θερμοκηπίου GHG στον κύκλο ζωής με χρήση ΥΦΑ αντί πετρέλαιο Diesel- MGO.

Αρκετά επιβατηγά πλοία νέας κατασκευής χρησιμοποιούν ΥΦΑ ως καύσιμο. Συνήθως χρησιμοποιούν σύστημα ηλεκτροπρόωσης με 4-χρονους μεσόστροφους κινητήρες για παροχή ηλεκτρικής ισχύος η οποία χρησιμοποιείται τόσο για την πρόωση όσο και τη «βοηθητική»/ηλεκτρική ισχύ. Υπό όλες τις συνθήκες, οι μεσόστροφοι 4-χρονοι κινητήρες που είναι δημοφιλείς στα επιβατηγά πλοία, έχουν υψηλότερες εκπομπές GHG του κύκλου ζωής κατά τη χρήση ΥΦΑ σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων.

Η χρήση ΥΦΑ θα μπορούσε να έχει κάποια περιφερειακά οφέλη, για παράδειγμα με τη μείωση εκπομπών του «μαύρου» άνθρακα στην Αρκτική. Ωστόσο, υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις χαμηλών και μηδενικών εκπομπών αντί των ορυκτών καυσίμων για τη ναυτιλία στην Αρκτική (Comer, 2019) και τη διεθνή ναυτιλία. Χρήση μηδενικών εκπομπών
μπορεί να προσφέρουν τεχνολογίες που θα βασίζονται σε μπαταρίες, κυψέλες καυσίμου υδρογόνου και αιολική πρόωση οι οποίες θα συνεισφέρουν τόσο στην ποιότητα του αέρα όσο και στο κλίμα γενικότερα.

Σημαντικότατο ρόλο στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας θα διαδραματίσει και η ψηφιοποίηση (ανάλυση, αξιολόγηση και χρήση δεδομένων) της λειτουργίας όλων των

επιμέρους σταδίων. Αναφορικά με τη λειτουργία και τη χρήση του πλοίου και του μηχανολογικού του εξοπλισμού, η χρήση αναλύσεων δεδομένων για την εξοικονόμηση όσο το δυνατόν περισσότερου καυσίμου και εκπομπών κατά τη διάρκεια της μακράς διέλευσης ενός πλοίου είναι πρωταρχικής σημασίας.

Η χρήση ιστορικών δεδομένων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ταχύτητας διέλευσης σε συνδυασμό με διάφορα μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης του εξοπλισμού και του βυθίσματος του πλοίου, των ρυθμίσεων αυτόματου πιλότου, της διακοπής του περιττού βοηθητικού εξοπλισμού και της μείωσης του αριθμού/ισχύος των κινητήρων επαρκώς στις συνθήκες της θάλασσας, θα βοηθήσουν σημαντικά την προσπάθεια απανθρακοποίησης της ναυτιλίας. Η χρήση εξελιγμένων λογισμικών θα συμβάλλει αποφασιστικά τόσο στην εφαρμογή όσο και στην παρακολούθηση/ πιστοποίηση της εφαρμογής των παραπάνω μέτρων μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της χρήσης των πλοίων.

Η «αλλαγή» τρόπου σκέψης, εκπαίδευσης και υιοθέτησης περιβαλλοντικής ευαισθησίας από το πλήρωμα και όλο το στελεχιακό δυναμικό της Ναυτιλίας θα είναι επίσης βασική προϋπόθεση για τη βέλτιστη αξιοποίηση όλων των τεχνολογικών εξελίξεων και εφαρμογών, για την επίτευξη του στόχου της απανθρακοποίησης της Ναυτιλίας.

Τέλος υπηρεσίες που σχετίζονται με τη Ναυτιλιακή βιομηχανία , όπως λιμενικές υποδομές ηλεκτροδότησης (μέσω ενέργειας από Α.Π.Ε.) των πλοίων κατά το διάστημα ελλιμενισμού, μείωση του χρόνου αναμονής για τον ελλιμενισμό, κλπ. θα συμβάλλουν σημαντικά στην απανθρακοποίηση της Ναυτιλίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. https://www.energy.gov/ia/downloads/understanding-natural-gas-and-lng-options-handbook

2. https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/sustainability-whitepaper-lng-as-marine-fuel.pdf

3. https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/alternative-fuels-outlook-shipping

4. https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2022/download-the-report.html

5. https://www.igu.org/resources/world-lng-report-2022/

6. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/LNG-as-marine-fuel-working-paper-02_FINAL_20200416.pdf

7. https://www.intechopen.com/chapters/64509 Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers

8. https://mdpi-res.com/d_attachment/sustainability/sustainability-14-03860/article_deploy/sustainability-14-03860-v3.pdf?version=1648638414

9. Wartsila 50DF: https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w50df.pdf?sfvrsn=9

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ - ΠΗΓΕΣ

1. BV_White Paper_Alternative fuels outlook for shipping
2. IGU-World-LNG-Report-2022_final
3. LNG-as-marine-fuel-working-paper-02_FINAL_20200416
4. IntechOpen: Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers. Tu Huan, Fan Hongjun, Lei Wei and Zhou Guoqiang
5. DNV_Maritime_Forecast_2050_2022-final (1)
6. ABS, sustainability-whitepaper-lng-as-marine-fuel
7. Understanding Natural Gas and Lng Options_general no appendix
8. www.Wartsila.com
9. www.wingd.com
10. www.man.com
11. MAN Diesel and Turbo. LNG Carriers with ME-GI Engine and High Pressure Gas Supply System. Available from: https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technicalpapers/lng-carriers-with-high-pressuregas-supply-system.
12. ABS (American Bureau of Shipping).Guide for Propulsion Systems for LNG Carriers. Houston: ABS Plaza; 2005

Αρκετές από τις εικόνες έχουν ληφθεί και από τις ιστοσελίδες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.