



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΠΜΣ «ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ»

**«Ανάλυση Κύκλου Ζωής Ναυτιλιακών Καυσίμων Σε  
Σενάρια Πραγματικών Συνθηκών και Καταστάσεων  
Πλεύσης»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΚΟΡΦΙΑΤΗΣ

**Επιβλέπουσα:** Μαρία Φούντη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα,  
Οκτώβριος 2022

Η σελίδα αυτή αφήνεται σκόπιμα κενή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΠΜΣ «ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ»

## «Ανάλυση Κύκλου Ζωής Ναυτιλιακών Καυσίμων Σε Σενάρια Πραγματικών Συνθηκών και Καταστάσεων Πλεύσης»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΚΟΡΦΙΑΤΗΣ

**Επιβλέπουσα:** Μαρία Φούντη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2022.

(Υπογραφή)

.....  
Μαρία Φούντη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Δημήτριος Λυρίδης  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Δημήτριος Γιαννόπουλος  
Μέλος ΕΔΙΠ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

---

(Υπογραφή)

.....  
**ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΚΟΡΦΙΑΤΗΣ**

Ναυπηγός Μηχανικός

© 2022 – All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

---

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τον υπολογισμό εκπομπών CO<sub>2</sub> σε τέσσερις (4) ξεχωριστές περιπτώσιολογικές μελέτες (case studies), δύο διαφορετικών ειδών πλοίων:

- ενός 38K DWT Bulk carrier με προωστήρια εγκατάσταση και ηλεκτρογεννήτριες με VLSFO/ MGO και
  - ενός LNG Carrier (160k m<sup>3</sup>) με Dual Fuel ηλεκτροκινητήρες MGO/ LNG,
- καθώς και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα αντίστοιχων πλοίων της 4ης μελέτης GHG του IMO (2020).

Οι τελικοί υπολογισμοί εκπομπών CO<sub>2</sub> αφορούν τα στάδια “Well-To-Tank”, “Tank-To-Propeller” και πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό υπολογισμού Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (AKZ) SIMAPRO, έκδοση 7.2. Το στάδιο “Well-To-Tank”, περιλαμβάνει τις έμμεσες εκπομπές και το στάδιο “Tank-To-Propeller” τις άμεσες εκπομπές, κατά την τελική χρήση του καυσίμου, προκειμένου να ολοκληρωθεί ένα δρομολόγιο, από το λιμάνι φόρτωσης, έως το λιμάνι εκφόρτωσης.

Ενώ οι τελικοί υπολογισμοί που αφορούν τα στάδια “Well-To-Tank” και “Tank-To-Propeller” και έγιναν με το λογισμικό SIMAPRO, τα δεδομένα (input) για τις καταναλώσεις των πλοίων, εξήχθησαν από τα εγχειρίδια των θαλάσσιων δοκιμών (sea trials) και εργαστηριακών δοκιμών (shop trials) των πλοίων που χορηγήθηκαν από τις διαχειρίστριες εταιρίες τους.

Η AKZ μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στον μακροπρόθεσμο στόχο Απανθρακοποίησης που έχει θέσει ο IMO για το 2050, υπολογίζοντας τις άμεσες και έμμεσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τα πλοία, βοηθώντας σημαντικά την ναυτιλιακή κοινότητα να αναδειξεί τα περιβαλλοντικά αποδοτικότερα πλοία.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε case study που αναλύθηκε, εκτός των οριακών συνθηκών, προσομοιάζονται πραγματικές αποστάσεις που εκτελούν τα υπό μελέτη πλοία, χρόνο παραμονής στα λιμάνια, ποσότητες φορτίου και σενάρια λειτουργίας μηχανημάτων έχοντας πάντα υπόψιν τους ισχύοντες κανονισμούς της MARPOL. Οι καταστάσεις πλεύσης, που αναφέρονται σε κάθε case study είναι: η πλεύση στο πέλαγος (cruising), πραγματοποίηση ελιγμών (maneuvering) και παραμονή στο λιμάνι/ αγκυροβόλιο (at port/anchorage).

Τα κύρια ευρήματα της εργασίας είναι η διαπίστωση ότι με την εισαγωγή πραγματικών στοιχείων καταναλώσεων από τα πλοία, μπορούμε, μέσω του SIMAPRO ή αντίστοιχων λογισμικών να εξάγουμε αξιόπιστα στοιχεία για τις πραγματικές εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου ενός πλοίου όπου σε συνδυασμό με αξιόπιστα στοιχεία για τις “Well-To-Tank” εκπομπές, μπορούμε να έχουμε έναν αξιόπιστο, πλήρη υπολογισμό AKZ. Τέλος, από τα δεδομένα της εργασίας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η έκλυση μεθανίου (methane slip) στην ατμόσφαιρα, που προκαλείται από την καύση του LNG στα πλοία, πρόκειται για ένα αξιοσημείωτο ποσοστό των συνολικών εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ανάλυση κύκλου ζωής, ναυτιλιακά καύσιμα, LNG, CO<sub>2</sub>, Well-to-Propeller, Bulk Carrier, LNG Carrier, GHG, EEOI,

---

---

## Abstract

The scope of work of present thesis is to assess the CO<sub>2</sub> emissions in four (4) separate case studies of voyages of two different types of ships:

- a 38K dwt Bulk carrier with Main and Auxiliary Engines running on VLSFO/ MGO and
- an LNG Carrier (160k m<sup>3</sup>) fitted with Dual Fuel (MGO/LNG) electric motors, as well as the comparison of their results with those of respective ships of the 4th IMO GHG study (2020).

The calculations of CO<sub>2</sub> emissions in terms of the "Well-To-Tank", "Tank-To-Propeller" stages and were carried out utilizing the Life Cycle Analysis (LCA) software SIMAPRO, vers 7.2. The "Well-To-Tank" stage includes the indirect while the "Tank-To-Propeller" stage the direct emissions, emitted during the final use of the fuel, in a vessel's route from loading port until discharging port.

The data input for vessels' machinery consumptions were extracted from the manuals of sea trials and shop trials provided by the Shipmanagement companies managing the above two vessels.

Life Cycle Assessment can make a significant contribution to the long-term Decarbonization target has been set for 2050 by the IMO calculating direct and indirect greenhouse gas emissions from ships, assisting the shipping industry to identify the most environmentally efficient ships.

It is worth noting that in each case study analyzed, apart from the limitations identified, there was a simulation of real distances covered by the ships under study, time of stay in the ports, cargo quantities carried and machinery operation scenarios, always having in mind the most current MARPOL regulations. The vessels' operating conditions mentioned for each case study are cruising, maneuvering, and staying at port/anchorage.

The main finding is undoubtedly the fact that an input of real consumption data from vessels, assessed through SIMAPRO or similar software, may result to reliable data for the actual Greenhouse Gas emissions emitted by a ship. Furthermore, in combination with reliable data concerning "Well- To-Tank" emissions, we may obtain a complete LCA calculation for any ship's route. Lastly, the conclusion that "methane slip", occurs when LNG does not used as a fuel in Engine but escapes in the atmosphere, is a significant percentage of the total emissions of Greenhouse Gases emitted from vessels utilizing LNG as bunker.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, marine fuels, LNG, CO<sub>2</sub>, Well-to-Propeller, Bulk Carrier, LNG Carrier, GHG, EEOI

---

---

## Ευχαριστίες/ Αφιερώσεις

Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον Δρ. Δημήτριο Γιαννόπουλο, Μηχ. Μηχανικό ΕΜΠ, μέλος ΕΔΙΠ στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, για την καθοδήγηση, την κατανόηση και την υπομονή που επέδειξε μέχρι το τέλος της εργασίας.
- Τους συνάδελφους, εργαζόμενους στο τεχνικό τμήμα ναυτιλιακών εταιριών, κκ Χρήστο Μάγκο και Δημήτριο Μπιτζανάκη, αμφότερους Μηχ. Μηχανικούς ΕΜΠ, για τα πολύτιμα στοιχεία που παρείχαν, εμπειρικά και μη.
- Τις διαχειρίστριες εταιρίες των 2 πλοίων αναφοράς της εργασίας για τα δεδομένα που παρείχαν απλόχερα.

Η εργασία και η όλη προσπάθεια που κατέβαλα για την διεκπεραίωση της ως εργαζόμενος φοιτητής και πατέρας αφιερώνεται στη σύζυγο μου Μαρία και στον υιό μου Πάνο, ο οποίος ήρθε στη ζωή τον Μάιο του 2021.

---

Η σελίδα αυτή αφήνεται σκόπιμα κενή.



# Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων .....	i
<i>Συντιμήσεις</i> .....	4
<b>1</b> <b>Εισαγωγή</b> .....	<b>6</b>
1.1    AKZ και ο στόχος του IMO για τον περιορισμό των αερίων θερμοκηπίου. ....	6
1.2    Στόχος και ανάπτυξη της εργασίας .....	6
1.3    Δομή της εργασίας .....	8
<b>2</b> <b>Ναυτιλιακά Καύσιμα: Υφιστάμενα, Μελλοντικά &amp; Νομοθεσία</b> .....	<b>9</b>
2.1    Νομοθεσία ναυτιλιακών καυσίμων και ατμοσφαιρικών ρύπων .....	10
2.1.1 <i>EEDI, EEXI &amp; CII</i> .....	10
2.1.2 <i>NOx και SOx</i> .....	11
2.1.3 <i>Το διοξείδιο του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>)</i> .....	13
2.1.4 <i>Οι Νηογνώμονες για τις νέες τεχνολογίες χαμηλών ρύπων</i> .....	15
2.1.5 <i>Υφιστάμενη και μελλοντική Ευρωπαϊκή (EU) Νομοθεσία για τις εκπομπές ρύπων</i> ..	16
2.1.6 <i>Πλάνο Ναυτιλιακής Νομοθεσίας για τις εκπομπές ρύπων έως το 2030</i> .....	18
2.2    Υφιστάμενα ναυτιλιακά καύσιμα .....	19
2.2.1 <i>Μαζούτ (βαρύ πετρέλαιο) / HFO (Heavy Fuel Oil)</i> .....	19
2.2.2 <i>Ναυτιλιακό Ντίζελ (Diesel Fuel Grades)</i> .....	21
2.3    Εναλλακτικά καύσιμα .....	23
2.3.1 <i>Φυσικό Αέριο (LNG)</i> .....	23
2.3.2 <i>Υγραέριο (LPG)</i> .....	25
2.3.3 <i>Μεθανόλη (Methanol)</i> .....	27
2.3.4 <i>Βιοκαύσιμα (Biofuels)</i> .....	29
2.3.5 <i>Υδρογόνο (Hydrogen)</i> .....	31

2.3.6	Αιολική πρόωση ( <i>Wind assisted propulsion</i> ).....	32
2.3.7	Συνθετικά καύσιμα ( <i>Synthetic fuels</i> ).....	34
2.3.8	Μπαταρίες ( <i>Batteries</i> ).....	37
2.3.9	Κυψέλες καυσίμου ( <i>Fuel cells</i> ).....	39
2.3.10	Αμμωνία ( <i>Ammonia</i> ).....	41
<b>3</b>	<b>Περιγραφή μεθοδολογίας AKZ και εφαρμογές στη ναυτιλία .....</b>	<b>42</b>
3.1	Μεθοδολογία και στάδια της AKZ (Γενικά).....	43
3.1.1	Σημαντικοί παράμετροι της AKZ.....	44
3.1.2	Σφάλματα και πρόληψη σφαλμάτων στην AKZ .....	45
3.2	Παραδείγματα εφαρμογών της AKZ .....	46
3.2.1	Εφαρμογή της AKZ στο πλοίο .....	47
3.2.2	Εφαρμογή της AKZ στα ναυτιλιακά καύσιμα.....	48
3.3	Υπολογισμός AKZ με χρήση λογισμικού (software) .....	49
3.3.1	Το λογισμικό SIMAPRO (έκδοση 7.2).....	49
<b>4</b>	<b>Περιγραφή των τεσσάρων (4) case studies, οριακές συνθήκες &amp; πλοία αναφοράς.....</b>	<b>51</b>
4.1	Περιορισμοί/ Οριακές συνθήκες.....	52
4.2	Περιγραφή Bulk Carrier πλοίου 38k DWT.....	54
4.2.1	Κύρια Χαρακτηριστικά και καταναλώσεις BC 38k DWT .....	54
4.2.2	Χρησιμοποιούμενα καύσιμα - Bulk Carrier 38k DWT .....	57
4.3	Περιγραφή LNG carrier 160k cbm .....	58
4.3.1	Κύρια Χαρακτηριστικά και καταναλώσεις LNG 160k cbm.....	58
4.3.2	Χρησιμοποιούμενα καύσιμα - LNG Carrier 160k DWT.....	60
4.4	Case Study No1 - Bulk Carrier - Δρομολόγιο: Corpus Christi – Θεσσαλονίκη .....	62
4.5	Case Study No2 - Bulk Carrier – Δρομολόγιο: Yuzhny – Paranagua.....	64
4.6	Case Study No3 - LNG carrier – Δρομολόγιο: Ras Laffan – Ρεβυθούσα.....	65
4.7	Case Study No4 - LNG carrier – Δρομολόγιο: Corpus Christi – Ρεβυθούσα.....	67
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα &amp; Συγκρίσεις με 4<sup>η</sup> Μελέτη GHG του IMO (2020) .....</b>	<b>70</b>
5.1	Well to tank εκπομπές (upstream emissions) ανά ταξίδι. ....	71
5.2	Υπολογισμοί εκπομπών GWP 100 (σε ton CO2 eq) ανά ταξίδι και κατάσταση πλοίου (λιμάνι, ελιγμούς, πλεύση).....	73

5.3	Υπολογισμοί παραμέτρων ΕΕΟΙ, ΑΕΡ, DIST και TIME ανά ταξίδι και σύγκριση με 4 <sup>η</sup> μελέτη GHG του IMO.....	74
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>77</b>
6.1	Επιμέρους συμπεράσματα.....	77
6.2	Σύγκριση Αποτελεσμάτων .....	78
6.3	Βελτίωση αποτελεσμάτων .....	79
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>Παράρτημα I: Καταναλώσεις – Καταστάσεις πλεύσης των 4 case studies .....</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Παράρτημα II: Υπολογισμοί με SIMA PRO 7.2 των 4 case studies.....</b>	<b>88</b>

## **Συντμήσεις**

ΑΠΕ - Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΑΚΖ – Αναλυση Κύκλου Ζωής

ΜΕΚ- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

ΚΚΖ- Κόστος Κύκλου Ζωής

AER - Annual Efficiency Ratio (gCO<sub>2</sub>/dwt\*nm)

AFI – Alternative Fuels Insight (DNV)

BOG - Boil Off –Gas

CCS- carbon capture and sequestration

CFC – Chloro Fluoro Carbons

CH<sub>4</sub> – Methane

CII -Annual Operational Carbon Intercity Indicator

CO<sub>2</sub> – Carbon Dioxide

cSt – Centistokes

DCS – Data Collection Scheme

DIST – Distance (Kg CO<sub>2</sub>/NM)

DWT - Deadweight

ECA – Emission Control Areas

EEDI - Energy Efficiency Design Index

EEOI - Efficiency Operational Indicator

EEXI - Energy Efficiency Existing Ship Index

ELCD - European reference Life Cycle Database

EMSA- European Maritime Safety Agency

EPER – European Pollutant Emission Register

EU ETS – EU Emission Trading Scheme

EU MRV - EU Monitoring, Reporting & Verification

FC- Fuel Cells

GHG – Green House Gases

HFO- Heavy Fuel Oil

HT-PEMFC - High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell

HVO – Hydrotreated Vegetable Oil

IGF Code - International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels

IMO – International Maritime Organization

IMRF – IMO Maritime Research Fund

ISO – International Standard Organization

LBG - Liquefied Biogas,

LBGFE- Lean Burn Gas Fueled Engines

LCA – Life Cycle Assessment  
LCI – Life Cycle Inventory analysis  
LCIA - Life Cycle Impact Assessment  
LNG – Liquefied Natural Gas  
LT-PEMFC - Low-temperature Proton exchange membrane fuel cell  
MBM – Market Based Measures  
MCR – Maximum Continuous Rating  
MEPC - Marine Environmental Protection Committee  
MGO – Marine Gas Oil  
MT – Metric Tons  
NETL - National Energy Technology Laboratory  
NO<sub>x</sub> – Oxides Nitrogen  
PCB - Polychlorinated biphenyls  
PEM - Polymer Electrolyte Membrane (κυψέλες πολυμερισμένης μεμβράνης)  
PM – Particulate Matters  
PSV – Platform Supply Vessel  
PtoF Power to Fuel  
PtoG Power to Gas  
PtoL Power to Liquid  
SCR – Selective Catalytic Reduction  
SECA – Sulphur Emission Control Areas  
SEEMP - Ship Energy Efficiency Management Plan  
SOFC - solid oxide fuel cell  
SO<sub>x</sub> – Oxides Sulphur  
TIME- Time (CO<sub>2</sub> emissions/ hour underway)  
VLGC – Very Large Gas Carrier  
VLSFO – Very Low Sulfur Fuel Oil (0.1% sulfur)  
VOC - Volatile Organic Compounds

## ***1.1 AKZ και ο στόχος του IMO για τον περιορισμό των αερίων θερμοκηπίου.***

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται μια μέθοδο αποτίμησης των άμεσων και έμμεσων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που προέρχονται από τα πλοία. Την μέθοδο μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Η AKZ μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στον μακροπρόθεσμο στόχο Απανθρακοποίησης που έχει θέσει ο IMO για το 2050 υπολογίζοντας τις άμεσες και έμμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η AKZ σαν εργαλείο μπορεί να αποτελέσει έναν πολύτιμο βοηθό την πράσινη ναυτιλία του μέλλοντος δίνοντας σημαντικές πληροφορίες στις διαχειρίστριες εταιρίες για ενεργειακά αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των πλοίων τους.

## ***1.2 Στόχος και ανάπτυξη της εργασίας***

Η εργασία εστιάζει στον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε τέσσερα (4) ξεχωριστά, υπερατλαντικά ταξίδια, δύο (2) διαφορετικών ειδών πλοίου, ενός 38k dwt bulk carrier και ενός 160k m<sup>3</sup> LNG Carrier. Επιπλέον, τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα, αντίστοιχων πλοίων της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO [1]. Τα ταξίδια που εξετάζονται είναι δύο (2) για κάθε πλοίο και τα συνολικά χρησιμοποιούμενα καύσιμα είναι τρία διαφορετικά, το MGO και VLSFO για το Bulk carrier και τα LNG και MGO για το LNG Carrier. Ο απώτερος στόχος είναι η δυνατότητα πληροφόρησης του πλοιοκτήτη/ ναυλωτή για το περιβαλλοντικά αποδοτικότερο πλοίο για να εκτελέσει ένα ταξίδι. Εκτός όμως από το πλοίο, που

«συνδέεται» άρρηκτα με τις εκπομπές Tank-to-Propeller, υπολογίστηκαν προσεγγιστικά και οι εκπομπές «Well-to-Tank» που συνδέονται με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα εξόρυξης και μεταφοράς των καυσίμων των πλοίων καθώς μέχρι σήμερα αυτός ο παράγοντας δεν λαμβάνεται σοβαρά υπόψη από την ναυτιλιακή αγορά αλλά αυτό αναμένεται να αλλάξει άρδην στις επόμενες διασκέψεις του IMO [2].

Ενώ οι τελικοί υπολογισμοί για τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που αφορούν τα στάδια Well-to-Tank και Tank-to-Propeller και έγιναν με το λογισμικό SIMAPRO, τα δεδομένα (input) για τις καταναλώσεις των μηχανημάτων πάρθηκαν από τα εγχειρίδια των θαλάσσιων δοκιμών (sea trials) και εργαστηριακών δοκιμών (shop trials) που χορηγήθηκαν από τις διαχειρίστριες εταιρίες των πλοίων. Οι αποστάσεις που διένυσαν τα πλοία στο κάθε ταξίδι, οι καταστάσεις πλεύσης, η ποσότητα μεταφερόμενου φορτίου καθώς και ο χρόνος παραμονής στα λιμάνια αντίστοιχα εκείνων που κάνει ένα πλοίο στην πραγματικότητα.

Απ' την άλλη πλευρά, οι καταναλώσεις των μηχανημάτων καθώς και ο χρόνος διεκπεραίωσης των ταξιδιών στην κάθε περίπτωση, διαφέρει από τις πραγματικές συνθήκες καθώς για παράδειγμα, όσον αφορά τις καταναλώσεις, τα εγχειρίδια sea trials, από τα οποία πάρθηκαν δεδομένα, αναφέρονται σε πλοίο κενό φορτίου ενώ στην εργασία θεωρήσαμε το πλοίο έμφορτο. Επιπλέον, δεν λήφθηκαν υπόψη οι όποιες καθυστερήσεις θα μπορούσαν να προκύψουν από τις καιρικές συνθήκες ή την αντίσταση τριβής από την πιθανόν λερωμένη γάστρα. Επίσης, οι Well-to-tank εκπομπές υπολογίστηκαν εντελώς προσεγγιστικά καθώς λήφθηκαν υπόψη τα έτοιμα data sheets που παρέιχε το SIMAPRO και όχι πραγματικά στοιχεία.

Τέλος, η σύγκριση με τους παραμέτρους (EEOI, AER, DIST και TIME) που χρησιμοποιεί ο IMO για την επίδραση των εκπομπών διοξειδίου του Άνθρακα στην Διεθνή Ναυτιλία μας αποδεικνύει ότι οι καταναλώσεις που μετρήθηκαν στην εργασία είναι χαμηλότερες των πραγματικών, όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω, καθώς η 4<sup>η</sup> μελέτη GHG του IMO (2020) βασίζεται σε πραγματικές καταναλώσεις που δηλώνουν τα πλοία σε ετήσια βάση στα πλαίσια του Κανονισμού για την κατανάλωση πλοίων [3].

### ***1.3 Δομή της εργασίας***

Η εργασία αποτελείται από 6 συνολικά κεφάλαια και 2 Παραρτήματα.

Το Κεφάλαιο 1 περιλαμβάνει την εισαγωγή. Το Κεφάλαιο 2 περιέχει γενικές αναφορές για τα ναυτιλιακά καύσιμα και τη νομοθεσία που τα διέπει. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η μεθοδολογία AKZ και οι εφαρμογές της στη Ναυτιλία. Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσονται τα 4 case studies που εξετάστηκαν καθώς και η περιγραφή των υπό μελέτη πλοίων, του 38k dwt bulk carrier και του 160k m<sup>3</sup> LNG carrier. Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν μέσω του SIMAPRO καθώς και η σύγκριση τους με την 4<sup>η</sup> Μελέτη GHG του IMO (2020) και τέλος, στο Κεφάλαιο 6 τα συμπεράσματα της εργασίας.

Τέλος, στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I παρατίθενται οι καταναλώσεις που χρησιμοποιήθηκαν σαν input στο SIMAPRO και για τις 4 περιπτώσεις και στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II, τα αποτελέσματα υπολογισμών μέσω του παραπάνω λογισμικού.



Η καύσιμη ύλη είναι εκείνη που χρησιμοποιεί κάθε κινούμενο μέσο ώστε να έχει την απαραίτητη ενέργεια να εκπληρώσει το σκοπό της ύπαρξης του. Η θάλασσα, που για χιλιάδες χρόνια, αποτελούσε την κύρια «οδό» μεταφοράς προσωπικού και αγαθών κυριαρχεί ακόμα και στις μέρες μας, κυρίως στον τομέα των αγαθών. Με τα χρόνια, τα καύσιμα των πλοίων είχαν και εξακολουθούν να έχουν, διάφορες διακυμάνσεις σε ποιότητα, τιμές και είδος στοχεύοντας πάντα στο χαμηλό κόστος, στην ασφάλεια και στην αποδοτικότητα των θαλασσιών μεταφορών. Τα τελευταία 20 χρόνια έχει εισαχθεί νομοθετικό πλαίσιο τόσο για τους κινητήρες (NOx Code, Tiers), όσο και για τον περιορισμό των εκπομπών ρύπων μέσω των καυσίμων.

Οι διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων ωστόσο, έχουν οδηγήσει την ναυτιλιακή κοινότητα στην ανακάλυψη νέων τεχνολογιών όπως για παράδειγμα τα συστήματα δέσμευσης ρύπων που έχουν ως απώτερο σκοπό την συνέχιση κατανάλωσης φθηνότερου καυσίμου από τις ναυτικές μηχανές. Τα κυριότερα αυτά συστήματα είναι η «επιλεκτική καταλυτική αναγωγή» (selective catalytic reduction) και οι «πλυντρίδες» (scrubbers units).

## **2.1 Νομοθεσία ναυτιλιακών καυσίμων και ατμοσφαιρικών**

### **ρύπων**

Τα τελευταία χρόνια και ειδικότερα απο την 19η Μάϊου 2005, όταν το ειδικό θεσμικό πλαίσιο της MARPOL (Annex VI) για τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOCs, PCBs, CFCs), τέθηκε σε ισχύ τα ναυτιλιακά καύσιμα εισήλθαν σε καθεστώς σημαντικών περιορισμών κυρίως, ως προς την περιεκτικότητα τους σε θείο (sulphur). Είναι γεγονός ότι όσο φθίνει η περιεκτικότητα τους σε θείο, τόσο η τιμή των κλασμάτων πετρελαίου αυξάνεται. Αναπόφευκτα, αυτό οδηγεί τους πλοιοκτήτες να αναζητήσουν εναλλακτικά καύσιμα με μηδενική περιεκτικότητα σε θείο ή στην εγκατάσταση ειδικών συστημάτων δέσμευσης ρύπων (π.χ. ένυδρες πλυντρίδες) ώστε τα πλοία τους να μπορούν χρησιμοποιούν φθηνότερα καύσιμα που περιέχουν όμως υψηλότερα ποσοστά θείου. Είναι γεγονός ότι από 1/1/2020, μετά την αναθεώρηση του εδαφίου VI της MARPOL, το παγκόσμιο όριο περιεκτικότητας σε θείο ανέρχεται σε 0,50% κ.β.

#### **2.1.1 EEDI, EEXI & CII**

Τελευταία, ο IMO έχοντας πάντα στραμμένο το βλέμμα στην στρατηγική για την μείωση των εκπομπών ρύπων έως το 2050, κατά την MEPC 76, τον Ιούνιο του 2021, ενέκρινε τροποποιήσεις στο Παράρτημα VI της MARPOL, εισάγοντας τον Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης για υπάρχοντα πλοία (EEXI) σε συμπλήρωμα του EEDI (Energy Efficiency Design Index) για τα νεότευκτα πλοία που προ-υπήρχε από την 1/1/2013. Οι απαιτήσεις για τον EEXI θα τεθούν σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2023 και θα ισχύσουν για όλα τα πλοία άνω των 400 GT που εμπίπτουν στο Παράρτημα VI της MARPOL. Στην ίδια συνεδρίαση, οριστικοποιήθηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές για τους υπολογισμούς, τις έρευνες και την επαλήθευση του EEXI. Οι οδηγίες υπολογισμού του EEXI αναφέρονται στην παλαιότερη οδηγία για τον EEDI, με ορισμένες προσαρμογές, όσον αφορά την περιορισμένη πρόσβαση στα δεδομένα σχεδίασης.

Ειδικότερα, από την 1/1/2023, ο **Energy Existing Ship Index (EEXI)**, θα δείχνει για κάθε πλοίο, την ενεργειακή του απόδοση και θα εκφράζεται σε ποσοστό έναντι του υφιστάμενου δείκτη (Energy Efficiency Design Index-**EEDI**). Επίσης, θα υπάρχει και ο **Annual Operational Carbon Intercity Indicator (CII)**, (Ετήσιος δείκτης έντασης λειτουργικού άνθρακα) για πλοία άνω των 5000 GT, που θα καθορίζει τον ετήσιο συντελεστή μείωσης που απαιτείται, για την διασφάλιση συνεχούς βελτίωσης της

λειτουργίας έναντι του εκπομπών CO<sub>2</sub> του πλοίου, εντός του επιπέδου διαβάθμισης A, B, C, D και E.

### 2.1.2 NOx και SOx

Αμέσως μετά τη θέσπιση Παραρτήματος VI της MARPOL το 2005, η MEPC (Marine Environmental Protection Committee) του IMO αποφάσισε να το αναθεωρήσει, με σκοπό να ενισχύσει τα όρια εκπομπών βάσει των νεότερων τεχνολογικών εξελίξεων. Το αναθεωρημένο Παράρτημα VI και ο Τεχνικός Κώδικας για τις εκπομπές NOx υιοθετήθηκαν το 2008 και τέθηκαν σε ισχύ το 2010. Οι κυριότερες αλλαγές αφορούσαν την προοδευτική μείωση των εκπομπών SOx, NOx (και έμμεσα της αιθάλης ή Particulate Matter, PM) και την εισαγωγή Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs), στις οποίες οι εκπομπές έπρεπε να είναι ακόμη χαμηλότερες. Το Παράρτημα VI όριζε αρχικά ένα άνω όριο της τάξεως του 4,5% κ.β. σε περιεχόμενο θείου στο καύσιμο πετρελαίου που χρησιμοποιείται από τα πλοία. Το όριο αυτό μειώθηκε περαιτέρω στο 3,5% κ.β. (2012) έως το σημερινό 0,5% κ.β. που ισχύει από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020. Το Παράρτημα VI περιέχει πρόβλεψη για ειδικές περιοχές όπου τα όρια εκπομπών SO<sub>2</sub> θα είναι αυστηρότερα (SOx Emission Control Areas – SECAs) και συγκεκριμένα στις περιοχές αυτές το περιεχόμενο σε θείο των καυσίμων αρχικά δεν έπρεπε να ξεπερνάει το 1,5% κ.β. Το όριο αυτό μειώθηκε στο 1% το 2010 και έγινε 0,1% από το 2015 <sup>[4]</sup>.

Ο Κανονισμός 13 της MARPOL καθορίζει τις ποσότητες των NOx τις οποίες επιτρέπεται ένα πλοίο να εκπέμπει ανά kW. Οι ποσότητες εξαρτώνται από τις στροφές του κινητήρα. Υπάρχουν τρία επίπεδα εκπομπών, τα Tier I-III. Όσο νεότερο είναι ένα πλοίο, τόσο αυστηρότερα είναι τα όρια. Οι προβλέψεις του Επιπέδου I (Tier I) στο [Σχήμα 2.1.1](#) αφορούν μηχανές εγκατεστημένες σε πλοία που κατασκευάστηκαν κατά ή μετά την 1/1/2000, ενώ τα όρια εκπομπών του Επιπέδου II (Tier II) αφορούν μηχανές εγκατεστημένες σε πλοία που κατασκευάστηκαν κατά ή μετά την 1/1/2011. Τα όρια του Επιπέδου III (Tier III) είναι τα αυστηρότερα και θα ισχύσουν μόνο στις Ειδικές Περιοχές για τα NOx (NOx Emission Control Areas – NECAs), για μηχανές σε πλοία που κατασκευάστηκαν κατά ή μετά την 1/1/2016. Συγκεκριμένα, τα όρια Tier III είναι κατά 80% αυστηρότερα σε σύγκριση με τα όρια Tier I. Οι NECAs αυτή τη στιγμή είναι θαλάσσιες περιοχές στη Β. Αμερική και την Καραϊβική <sup>[5]</sup>.

Tier	Ημερομηνία κατασκευής πλοίου (κατά ή μετά την)	Όρια εκπομπών NOx (g/kWh), n = ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
<b>I</b>	1 Ιανουαρίου 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ π.χ., 720 rpm – 12.1	9.8
<b>II</b>	1 Ιανουαρίου 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$	7.7

			π.χ., 720 rpm – 9.7	
<b>III</b>	1 Ιανουαρίου 2016	3.4	9-η <sup>(0.2)</sup> π.χ., 720 rpm – 2.4	2.0

Σχήμα 2.1.1 Όρια στις περιοχές των NOx. Πηγή: IMO.

Οι περιοχές ελέγχου εκπομπών ρύπων αφορούν, προς το παρόν, ορισμένες περιοχές παγκοσμίως, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.2 παρακάτω:

Area	Engines	% Max Sulphur content by weight & ISO 8217 DM Grade	Effective	Regulation
All EU Ports (including Turkey)	All vessels at berth for > 2 hours	0.1% - All Grades	01 JAN 2010	EU Directive (EU) 2016/802 & Turkish Authorities
Within 24 miles offshore California	All (main & auxiliary diesel engines and auxiliary boilers)	0.1% DMA or DMB	01 JAN 2014	CARB
United States Caribbean Sea Area	All	0.1 % - All Grades	01 JAN 2015	MEPC.202(62)
Baltic & North Sea ECA's	All	0.1% - All Grades	01 JAN 2015	IMO
All worldwide ECAs set by MARPOL ANNEX VI	All	0.1% - All Grades	01 JAN 2015	MEPC.1/ Circ.723
<b>Hong Kong</b>	All, prior entry to HK Domestic Emission Control Areas (DECA)	0.5 % - All Grades	01 JAN 2019	Hong Kong Legislative Council
12 nautical miles of the baseline extension of <b>Chinese territorial sea</b> (excluding waters under the jurisdiction of Hong Kong, Macao and Taiwan), Hainan waters and ports specially designated.	All engines should change to MGO, upon ship's entry to Coastal Area (12 NM)	0.5 % - All Grades	01 JAN 2019	Chinese Government
<b>Worldwide</b>	All	0.5% - All Grades	<b>01 JAN 2020:</b> (Depending on the outcome of a review, to be concluded in 2018, as to the availability of the required fuel oil, this date could be deferred to 1 January 2025)	IMO
<b>Korean ECA</b> (Incheon area, Pyeongtaek & Dangjin area, Yeosu & Gwangyang area , Busan area , Ulsan area)	All	0.1% - All Grades	<b>01 SEPT. 2020</b>	Korean Government

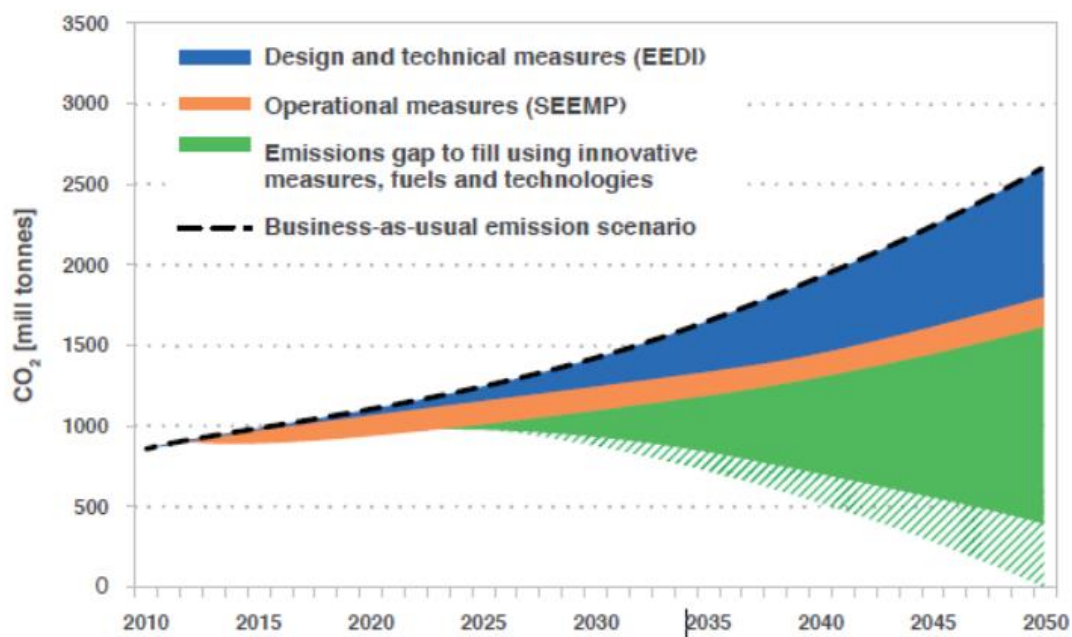
Πίνακας 2.1.2 Πίνακας Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas– ECAs ). Πηγή: Marineinsight.

### 2.1.3 Το διοξείδιο του Άνθρακα (CO<sub>2</sub>)

Η τρίτη κατά σειρά μελέτη του IMO, που δημοσιεύθηκε το 2014 και έχει ως στόχο την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) υπολόγισε ότι το 2012 απελευθερώθηκαν 796 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub>, αντιπροσωπεύοντας το 2,2% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται απ' τον άνθρωπο. Επίσης, αναφέρεται ότι η πρόβλεψη για την αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub> θα είναι μεταξύ 50% - 250% έως το 2050 κυρίως, εξαιτίας της αύξησης του παγκόσμιου θαλάσσιου εμπορίου. Στο πλαίσιο αυτό, ο IMO συμμετέχει ενεργά σε μια προσπάθεια για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων και την ανάπτυξη μέτρων για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Από το 2011, υιοθέτησε μια σειρά τεχνικών μέτρων τα οποία εντάχθηκαν στο κεφάλαιο VI της MARPOL και είχαν ως στόχο την «ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων» (Energy efficiency of ships). Τα μέτρα αυτά, χωρίζονται σε δύο υπομέτρα <sup>[6]</sup>:

- Τον δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης (Energy Efficiency Design Index, EEDI), ο οποίος απαιτεί από τα νεότευκτα πλοία να συμμορφώνονται με τον ελάχιστο δυνατό δείκτη ενεργειακής απόδοσης. Ο δείκτης υπολογίζεται από το ναυπηγείο στην φάση του σχεδιασμού και κατασκευής του πλοίου. Έχουν εξαχθεί 3 φάσεις υλοποίησης για τον δείκτη, με την πρώτη φάση να είναι για πλοία που ναυπηγήθηκαν μεταξύ 2015-19, η 2<sup>η</sup> φάση μεταξύ 2020-24 και η 3<sup>η</sup> και τελευταία φάση από το 2025- ύστερα. Κάθε φάση έχει ως στόχο την περαιτέρω μείωση του EEDI που σημειωτέων ποικίλει ανάλογα το είδος πλοίου αλλά και το μέγεθος του. Με απλά λόγια, η μείωση του EEDI έχει ως απώτερο σκοπό να οδηγήσει σε ενεργειακά αποδοτικότερα πλοία.
- Το Εγχειρίδιο ενεργειακής απόδοσης πλοίου (Ship Energy Efficiency Plan, SEEMP) το οποίο πρέπει να υπάρχει και τηρείται σε όλα τα πλοία άνω των 400 KOX (GT). Μέσω του εγχειριδίου, εισάγονται διαδικασίες βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Ο κανονισμός ισχύει για υπάρχοντα αλλά και για τα νέα πλοία.

Ο στόχος του IMO είναι η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που προέρχεται απ' τα πλοία κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, σε σχέση με το 2008, στοχεύοντας ακόμη ψηλότερα, στο 70% έως το 2050.



**Σχήμα 2.1.3** Πρόβλεψη μείωσης εκπομπών του διοξειδίου Άνθρακα έως το 2050. Πηγή: IMO.

Τα μέτρα προς αυτή την κατεύθυνση συζητήθηκαν και στην 74<sup>η</sup> διάσκεψη της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) τον Ιούνιο του 2019, όπου μεταξύ άλλων, συζητήθηκαν μέτρα που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τα ναυτιλιακά καύσιμα όπως την υιοθέτηση του ψηφίσματος MEPC.323 (74) σχετικά με την «πρόσκληση προς τα κράτη μέλη να ενθαρρύνουν την εθελοντική συνεργασία μεταξύ των λιμενικών και ναυτιλιακών τομέων ώστε να συμβάλουν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία». Το ψήφισμα αυτό αποσκοπεί στην προώθηση ρυθμιστικών, τεχνικών, επιχειρησιακών και οικονομικών δράσεων στον λιμενικό τομέα, όπως η ανάπτυξη του δυναμικού παραγωγής ενέργειας στην ξηρά (κατά προτίμηση από ανανεώσιμες πηγές), η προμήθεια εναλλακτικών καυσίμων, χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα, των κινητήρων χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για την προώθηση της βιώσιμης ναυτιλίας και τη βελτιστοποίηση των επισκέψεων των πλοίων στα λιμάνια, συμπεριλαμβανομένης της έγκαιρης άφιξης<sup>[6]</sup>.

#### 2.1.4 Οι Νηογνώμονες για τις νέες τεχνολογίες χαμηλών ρύπων

Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών για την συμμόρφωση των πλοίων με τους νέους κανονισμούς χαμηλών ρύπων οδήγησε τους νηογνώμονες να νομοθετήσουν διαδικασίες αξιολόγησης των διαφόρων συστημάτων που πρόκειται να εγκατασταθούν σε πλοία καθώς και κανόνες για τις περιοδικές επιθεωρήσεις τους. Ειδικότερα, υπάρχουν νομοθετικά πλαίσια από τους Νηογνώμονες για τις παρακάτω νέες τεχνολογίες χαμηλών ρύπων:

➤ **Πλοία προωθούμενα με LNG ή LPG (Gas fueled ships):** Οι νηογνώμονες επιθεωρούν αυτού του είδους τα πλοία σύμφωνα με «Διεθνή Κώδικα Ασφάλειας για τα πλοία που κινούνται με φυσικό αέριο ή με καύσιμα χαμηλής θερμοκρασίας ανάφλεξης» (International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels, IGF Code) που έχει τεθεί σε ισχύ από την 1/1/2017. Επιπλέον, έχουν εισάγει την πρόσδωση υποχρεωτικών (π.χ. “Gas Fueled”) και εθελοντικών (“Gas Ready”), χαρακτηρισμών κλάσης, γνωστά και ως Class Notations, πάντα σε συμμόρφωση με τον IGF Code<sup>[6]</sup>.

➤ **Πλοία προωθούμενα με μπαταρίες (Battery powered vessels):** Δεν υπάρχει κάποιος Διεθνής κώδικας που να διέπει την επιθεώρηση τους ωστόσο ο έλεγχος εγκαταστάσεων αποτελούμενων από μπαταρίες ιόντων λιθίου διέπονται από τους κανονισμούς των Νηογνώμωνων (Rules for Classification of ships). Ως προς τον χαρακτηρισμό κλάσης των πλοίων, συναντάμε τους υποχρεωτικούς χαρακτηρισμούς “Battery Safety” και “Battery Power”<sup>[6]</sup>.

➤ **Πλοία με εγκατεστημένες ένυδρες πλυντρίδες (scrubber units):** Από τις 15/5/2015, ο IMO έχει εκδώσει την διακήρυξη Resolution MEPC.259(68) “2015 Guidelines for exhaust gas cleaning systems” με την οποία θα πρέπει να συμμορφώνονται τα πλοία που θα εγκαταστήσουν τον συγκεκριμένο τύπο εξοπλισμού δέσμευσης ρύπων. Σύμφωνα με την Διακήρυξη, ο πλοιοκτήτης έχει 2 επιλογές για την επίτευξη έγκρισης από τον Νηογνώμονα. Την 1<sup>η</sup> επιλογή (Scheme A), μέσω της έκδοσης πιστοποιητικού “Type Approval” για την εγκατάσταση και την 2<sup>η</sup> επιλογή (Scheme B), μέσω της συνεχούς επιτήρησης των επιπέδων των ρύπων που παράγουν τα καυσαέρια, με την εγκατάσταση σε λειτουργία. Η 2<sup>η</sup> επιλογή συνεπάγεται και με την προμήθεια σχετικού τεχνικού εξοπλισμού. Η Νηογνώμονες θα πρέπει να εγκρίνουν την εγκατάσταση κατόπιν αίτησης του κατασκευαστή για ορισμένη εγκατάσταση και τύπο πλοίου<sup>[7]</sup>.

➤ **Πλοία με εγκατεστημένα συστήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cells):**

Ο DNV, από τον Ιανουάριο του 2017, εισήγαγε στους κανονισμούς που αφορούν την κατηγοριοποίηση των χαλύβδινων πλοία κανονισμούς για τις κυψέλες καυσίμου (DNV GL rules for classification, Part 6, Chapter 2, Section 3 “Fuel Cell Installations – FC”. Ακολούθησε τον Νοέμβριο του 2019, ο Αμερικάνικος Νηογνώμονας που εισήγαγε στους

κανονισμούς του τον σχετικό οδηγό «GUIDE FOR FUEL CELL POWER SYSTEMS FOR MARINE AND OFFSHORE APPLICATIONS».

### **2.1.5 Υφιστάμενη και μελλοντική Ευρωπαϊκή (ΕU) Νομοθεσία για τις εκπομπές ρύπων**

Εκτός από το παγκόσμιο νομοθετικό πλαίσιο, ειδικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει θεσπιστεί νομοθεσία που συνδέεται με τις εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι ο Ευρωπαϊκός κανονισμός **EU MRV (Regulation (EU) 2015/757)**.

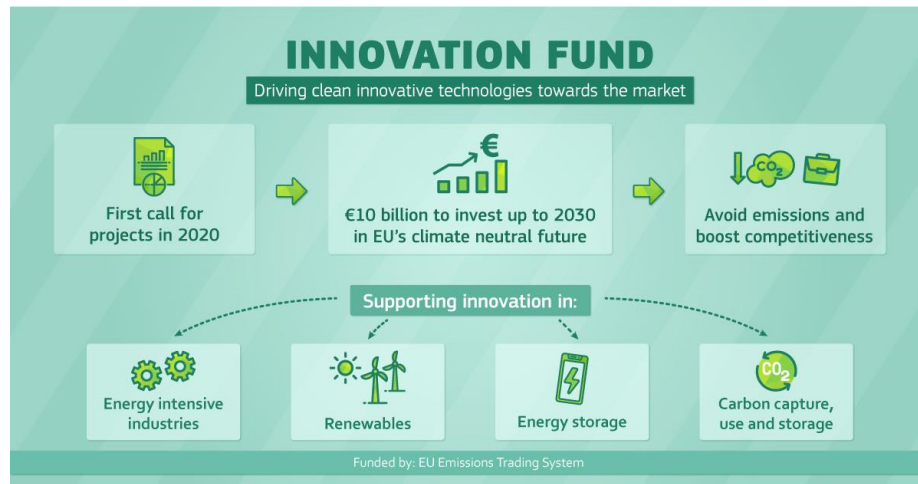
Ο παραπάνω κανονισμός αφορά τον έλεγχο, την αναφορά και την επιβεβαίωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από τις θαλάσσιες μεταφορές (πλοία) στα Ευρωπαϊκά λιμάνια. Ο κανονισμός τέθηκε σε ισχύ την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2015 και αφορά όλα τα πλοία, άνω των 500 GT, ανεξαρτήτως σημαίας. Πιο συγκεκριμένα, όλες οι διαχειρίστριες εταιρίες, αρχής γενομένης από το 2018 και έπειτα, ανά ημερολογιακό έτος, θα πρέπει να αναφέρουν τις εκπομπές CO<sub>2</sub> για τα δρομολόγια των πλοίων τους, από και προς τα κοινοτικά λιμάνια. Εν συνεχεία, τα δεδομένα θα αξιολογούνται από ανεξάρτητους οργανισμούς (π.χ. Νηογνώμονες), θα επιστρέφουν στον πλοιοκτήτη και τέλος θα «ανεβαίνουν» σε μια βάση δεδομένων, την «THETIS-MRV», όπου ο καθένας θα μπορεί να έχει πρόσβαση ώστε να πληροφορείται τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά πλοίο και ανά περίοδο.

Επίσης, στον IMO, τον Ιούλιο του 2011, στην συνδιάσκεψη MEPC 62, καθιερώθηκε ένα πλάνο συζητήσεων και εργασιών, γνωστό ως «**Market Based Measures**» (MBM) που αποσκοπεί στην ενθάρρυνση της ναυτιλιακής βιομηχανίας να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου μέσω αποδοτικότερων πλοίων και διαχείρισης από τις εταιρίες, καθώς και να θέσει κάποια όρια στις αυξανόμενες εκπομπές αερίων από τα πλοία, όπου υπάρχουν. Στα πλαίσια του MBM, η Ευρωπαϊκή Ένωση Εφοπλιστών (European Community Shipowners Association, ECSA) μαζί με το Διεθνές Επιμελητήριο Ναυτιλίας (International Chamber of Shipping) εξέφρασαν την άποψη, στα πλαίσια του συστήματος εμπορίας ρύπων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, (EU-Emission Trading System, EU-ETS), να θεσπιστεί μια σειρά από κανονισμούς όσον αφορά τη ναυτιλία.

Οι νέοι κανονισμοί θα διέπουν τις ενέργειες του κλάδου της ναυτιλίας για επίτευξη του στόχου του IMO για την μείωση ρύπων. Μεταξύ άλλων, μία εκ των προτάσεων, είναι διεκδίκηση μεριδίου από το Ταμείο Έρευνας και Ανάπτυξης (Innovation Fund) της Ευρωπαϊκής Ένωσης με σκοπό την χρηματοδότηση έρευνας για τα «καθαρά» καύσιμα στην ναυτιλία. Τα έσοδα του Ταμείου εκτιμώνται σε 10 δις Ευρώ για την δεκαετία 2020-30 και προέρχονται από την εξαγορά της περίσσειας των ορίων ρύπων (cap) <sup>181</sup>. Ωστόσο, η τιμή του άνθρακα (carbon pricing) έχει γίνει αντικείμενο συζήτησης, καθώς στόχος της πρότασης είναι



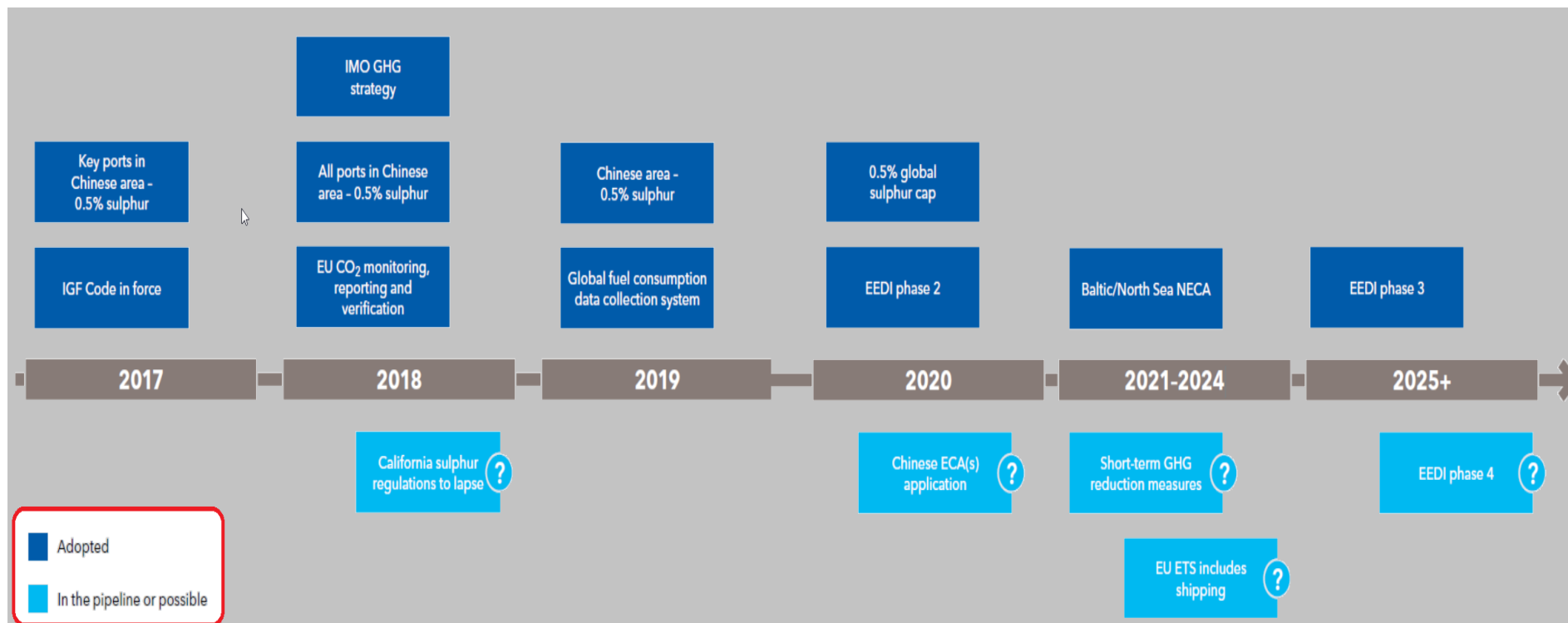
να μην πληγούν οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις που αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της ναυτιλίας<sup>19]</sup>. Τέλος, στη σύνοδο MEPC 77 του IMO η οποία έλαβε χώρα τον Νοέμβριο του 2021, αποφασίστηκε να επανεξεταστεί το ενδεχόμενο της σύστασης του International Maritime Research Fund (IMRF) και στις επόμενες συνεδριάσεις της MEPC.



**Σχήμα 2.1.1** Λειτουργία του Ταμείου Καινοτομίας. Πηγή: European Commission

Μία άλλη πρόταση αφορά τη δημιουργία του **Fuel EU Maritime**. Το Fuel EU Maritime θα έχει στον πυρήνα του ένα πρότυπο (standard) για τα καύσιμα. Η διαφορά με το ISO standard 8217 είναι ότι την υποχρέωση εφαρμογής θα έχουν τα πλοία αντί για τους προμηθευτές καυσίμων. Όπως είναι αντιληπτό, υπάρχουν σοβαρές ενστάσεις και αμφιβολίες για την εφαρμογή του παραπάνω προτύπου καθώς δεν μπορεί να εξακριβωθεί με βεβαιότητα αν θα μπορέσει να αποδώσει τα περιβαλλοντικά οφέλη στα οποία αποσκοπεί.

### 2.1.6 Πλάνο Ναυτιλιακής Νομοθεσίας για τις εκπομπές ρύπων έως το 2030



Σχήμα 2.1.2 Χρονοδιάγραμμα εφαρμογής ναυτιλιακών κανονισμών που έχουν ως στόχο την μείωση των εκπομπών ρύπων έως το 2030. Πηγή: DNV

## 2.2 Υφιστάμενα ναυτιλιακά καύσιμα

Σαν υφιστάμενα ναυτιλιακά καύσιμα, ορίζονται τα καύσιμα που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς καυσίμων στη σημερινή ναυτιλία (2020). Τα καύσιμα αυτά δεν είναι άλλα από το μαζούτ και τις περεταίρω κλασματικές αποστάξεις του, όπως το ναυτιλιακό ντήζελ. Η περιεκτικότητά τους σε θείο παίζει καθοριστικό ρόλο για την συμμόρφωσή τους με τους κανονισμούς (βλ. [παρά. 2.1](#)).

### 2.2.1 Μαζούτ (βαρύ πετρέλαιο) / HFO (Heavy Fuel Oil)

Το Μαζούτ (Heavy Fuel Oil) είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο ναυτιλιακό καύσιμο καθώς βρίσκεται χαμηλά στην στήλη αποστάξεως γεγονός που το καθιστά φθηνό και σχετικά εύκολα διαχειρίσιμο για καύση σε μεσόστροφους ή και αργόστροφους ναυτικούς κινητήρες.

Το μαζούτ αποτελεί υπόλειμμα της κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος του υπολείμματος της ατμοσφαιρικής απόσταξης υφίσταται περαιτέρω διεργασίες για την παραγωγή διαυγών προϊόντων (βενζίνη, ντήζελ, κλπ.). Κύρια πηγή λοιπόν του μαζούτ είναι το επεξεργασμένο υπόλειμμα της απόσταξης υπο κενό, που συχνά, αναμιγνύεται με ελαφρύτερα κλάσματα, όπως το Marine Gasoil, για να μπορεί να ικανοποιήσει τις λειτουργικές απαιτήσεις.<sup>[10]</sup>

Όπως προαναφέρθηκε, πλεονεκτεί έναντι των άλλων κλασμάτων πετρελαίου ως προς την τιμή αγοράς. Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση συνέπειά της διεύρυνσης του παγκόσμιου θαλάσσιου εμπορίου δεν αποτέλεσε ιδιαίτερο πρόβλημα διότι το δίκτυο εγκαταστάσεων διυλιστηρίων είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένο σε παγκόσμια κλίμακα. Η μεταφορά του καυσίμου δε, από τα διυλιστήρια στα πλοία, πραγματοποιείται με μικρά δεξαμενόπλοια, που διανύουν συνήθως μικρές αποστάσεις, διατηρώντας το κόστος μεταφοράς σε χαμηλά επίπεδα.

Από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020, μέσω αναθεώρησης του παραρτήματος VI της MARPOL, έχει τεθεί σε εφαρμογή ο περιορισμός της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο στο επίπεδο του  $\leq 0,50\%$  κ.β. Παράλληλα, οι πλοιοκτήτες πρέπει να λάβουν υπόψη και τις περιοχές SECA (Ship Emission Control Areas) σε Ευρώπη και Αμερική, όπου το όριο για το θείο παραμένει στο  $\leq 0,10\%$  κ.β.

Συνεπώς, η ναυτιλιακή κοινότητα έχει τεθεί αντιμέτωπη με το εξής δίλημμα: α) Την υιοθέτηση ενός νέου, ακριβότερου καυσίμου με περιεκτικότητα σε θείο  $\leq 0,5\%$  (και  $\leq 0,10\%$  για περιοχές SECA) ή β) Την συνέχιση κατανάλωσης φθηνότερου καυσίμου με υψηλότερα ποσοστά θείου αλλά ταυτόχρονη εγκατάσταση συστημάτων δέσμευσης ρύπων (π.χ.

πλυντρίδες ή επιλεκτική καταλυτική αναγωγή) με πιο δημοφιλή μέθοδο τις **πλυντρίδες (scrubbers)**. Το ενδεικτικό κόστος εγκατάστασης πλυντρίδων ποικίλει ανάλογα το μέγεθος της Προωστήρια εγκατάστασης αλλά προσδιορίζεται περίπου στα 150\$/ kW για κινητήρα έως 5,000Kw και 100\$/ kW για κινητήρα έως 40,000Kw <sup>[6]</sup>. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το τελικό κόστος επένδυσης για την συμμόρφωση ενός πλοίου με τους νέους κανονισμούς, μπορεί να ανέλθει από αρκετές χιλιάδες, έως και μερικά εκατομμύρια δολάρια. Αναμφισβήτητα, είναι μια επένδυση που για τα μεγαλύτερα σε ηλικία πλοία, μπορεί εύκολα να καταστεί οικονομοτεχνικά ασύμφορη. Εκτός όμως του κόστους εγκατάστασης των scrubbers, θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος κατανάλωσης ενέργειας που απαιτείται, ώστε να πραγματοποιηθεί η αποθείωση των αέριων ρύπων από τα καυσαέρια, φθάνοντας στα αποδεκτά όρια SOx και NOx. Αυτό το κόστος εκτιμάται από τον DNV, σε περίπου 1-2% της συνολικής ενέργειας που παράγουν οι ηλεκτρογεννήτριες του πλοίου <sup>[6]</sup>.

Σύμφωνα με μελέτη του CE Delft από τον Ιούλιο 2016 <sup>[11]</sup>, έως το τέλος του 2020, αναμένεται να υπάρχουν 4,000 πλοία με εγκατεστημένα scrubber units. Αναπόφευκτα, μετά το 2020, θα επηρεαστεί η ζήτηση, σε μαζούτ υψηλότερου θείου, που αναμένεται να κυμανθεί στο 10-15% της παγκόσμιας ζήτησης για ναυτιλιακά καύσιμα <sup>[11]</sup>.

Ωστόσο, ένας προβληματισμός που παραμένει ως προς την χρησιμοποίηση μαζούτ υψηλότερου θείου έχει να κάνει με την ποιότητα καυσίμων που διακινούνται στην παγκόσμια ναυτιλιακή αγορά. Ο IMO σε μια προσπάθεια να περιορίσει τα φαινόμενα διακίνησης ακατάλληλων καυσίμων, τον Νοέμβριο του 2018, εξέδωσε την εγκύκλιο MEPC.1/Circ. 875/Add.1 που αναφέρεται στην βέλτιστη πρακτική που θα πρέπει να ακολουθούν οι προμηθευτές για την διασφάλιση της ποιότητας καυσίμων που παραδίδονται στα πλοία. Αντίστοιχα, οι πλοιοκτήτριες εταιρίας θα πρέπει να ελέγχουν την ποιότητα καυσίμων που παραλαμβάνουν τα πλοία, μέσω του ISO 8217 (Πίνακας 2.2.1) παρακάτω.

Παράμετροι	Μονάδα	Όριο	RME 180	RMG 380	RMK 500/700
Ιξώδες στους 50°C	mm <sup>2</sup> /s	Max.	180	380	500/ 700
Ποκνότητα στους 15°C	kg/m <sup>3</sup>	Max.	991	991	1010
Micro Carbon Residue	% m/m	Max.	15	18	20
Aluminum + Silicon	mg/kg	Max.	50	60	60
Νάτριο	mg/kg	Max.	50	100	100
Στάχτη (Ash)	% m/m	Max.	0.07	0,10	0,15
Βανάδιο	mg/kg	Max.	150	350	450

Δείκτης Αρωματικότητας	-	Max.	860	870	870
Νερό	% V/V	Max.	0.5	0,5	0,5
Θερμ. Ανάφλεξης*	°C	Min.	60	60	60
Θειάφι	% m/m	Max.	Ανάλογα την ισχύουσα νομοθεσία		
*Η ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης για τα ναυτιλιακά καύσιμα ορίζεται στο Κεφ. Π-2/ Καν. 4 της αναθεωρημένης SOLAS '74.					

**Πίνακας 2.2.1** Όρια συστατικών των κλασματικών αποστάξεων του αργού πετρελαίου, κινηματικού ιξώδους 180, 380 και 500/700 centistokes ( $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/sec) όπως ορίζονται στο ISO 8217:2017 “Petroleum Products”.

### 2.2.2 Ναυτιλιακό Ντίζελ (Diesel Fuel Grades)

Το ναυτιλιακό ντίζελ (Diesel fuel) μοιράζεται μαζί με το μαζούτ το μεγαλύτερο κομμάτι της πίτας στην αγορά των ναυτιλιακών καυσίμων.

Το ντίζελ είναι σύνθετο μίγμα υδρογονανθράκων που αποτελεί μίγμα προϊόντων διαφόρων διεργασιών. Επίσης, αποτελεί κλάσμα απόσταξης μεταξύ θερμοκρασιών 150-380°C που είναι ο στόχος για να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές.

Παράγεται κυρίως από ατμοσφαιρική απόσταξη αλλά και από άλλες μονάδες μετατροπής. Ωστόσο ο τύπος του αργού πετρελαίου επηρεάζει την ποιότητα και ποσότητα παραγόμενου ντίζελ <sup>[10]</sup>.

Η εξισορρόπηση της παραγωγής με τη ζήτηση επιτυγχάνεται με διεργασίες μετατροπής όπως:

- Θερμική πυρόλυση
- Ιξωδόλυση
- Εξανθράκωση
- Καταλυτική πυρόλυση
- Υδρογονοπυρόλυση

Οι τύποι των ναυτιλιακών ντίζελ όπως ορίζονται στο ISO 8217:2017 είναι οι εξής:

DMX, DMA, DFA, DMZ, DFZ, DMB, και DFB.

- Το DMX δεν έχει εφαρμογή στην ναυτιλία καθώς οι προδιαγραφές του για την ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης (43°C) δεν πληρούν εκείνες που ορίζονται στην SOLAS (ελάχιστη θερμοκρασία 60°C).
- Το DMA (Marine Gas Oil) είναι ο πιο ευρέως διαδομένος τύπος ναυτιλιακού καυσίμου, καθώς σύμφωνα με το ISO 8217, δεν θα πρέπει να περιέχει κατάλοιπα βαρύτερων αποστάξεων (π.χ μαζούτ). Επίσης, η χαμηλή περιεκτικότητα του σε θείο το καθιστά συμβατό με τους νέους κανονισμούς ( $\leq 0,5\%$  κ.β. σε θείο) <sup>[6]</sup>.

- Το DMB (Marine Diesel Oil) είναι ο τύπος ντήζελ που επιτρέπεται να περιέχει ίχνη βαρύτερων αποστάξεων πετρελαίου. Η περιεκτικότητα του όμως σε θείο, που είναι υψηλότερη από το επιτρεπτό όριο, το έχει θέσει στην ουσία εκτός ναυτιλιακής αγοράς από αρχές του 2020.
- Οι σειρές DFA, DFZ και DFB αποτελούν την νέα DF σειρά του ISO 8217 και εντάχθηκαν στην τελευταία, 6<sup>η</sup> έκδοση, το 2017. Κύριο χαρακτηριστικό της DF σειράς είναι ότι επιτρέπει μέχρι 7% κατ' όγκο μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων [Fatty acid methyl esters (FAME)]. Η DF σειρά δημιουργήθηκε ώστε να βελτιώσει την διαθεσιμότητα στα λιμάνια επιπλέον καυσίμων που θα είναι συμβατά με τους αναθεωρημένους κανονισμούς της MARPOL (όριο 0,1 ή 0,5% θείο) <sup>[12]</sup>.

Όπως προαναφέρθηκε, το DMA (Marine Gas Oil), λόγω των ιδιοτήτων του και της συμμόρφωσης του με τους κανονισμούς για εκπομπές ρύπων, αποτελεί την βασική επιλογή για πλοία που δεν είναι εφοδιασμένα με συστήματα δέσμευσης ρύπων. Αντίθετα όμως, αποτελεί μειονέκτημα το γεγονός ότι στις μέρες μας, η τιμή αγοράς ανά τόνο είναι η υψηλότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα ναυτιλιακά καύσιμα.

LOCATIONS Τύπος Καυσίμου Θειάφι	FUEL GRADES & PRICES (\$)			
	HSFO 3.5%	VLSFO 0.5%	MGO 0.1%	ULSFO 0.1%
<b>North West</b>				
St.Petersburg Sept. 2020	257	315	355	335
St.Petersburg Sept. 2022	428	645	974	N/A
Rotterdam Sept. 2020	268	312	375	360
Rotterdam Sept. 2022	428	625	870	N/A
<b>Black Sea</b>				
Istanbul Sept. 2020	295	335	405	N/A
Istanbul Sept. 2022	665	780	1180	N/A
<b>Mediterranean Sea</b>				
Gibraltar Sept. 2020	305	330	400	N/A
Gibraltar Sept. 2022	465	679	1100	N/A
Piraeus Sept. 2020	N/A	360	390	N/A
Piraeus Sept. 2022	426	645	974	N/A

**Πίνακας 2.2.2** Διακυμάνσεις δολαριακών τιμών MGO, IFO, VLSFO και ULSFO ανά τοποθεσία. Πηγή: Crossoffice.eu, (Σεπτ. 2020) και Spectra fuels (23 Σεπτ. 2022).

## 2.3 Εναλλακτικά καύσιμα

Τα τελευταία χρόνια, ως εναλλακτικά καύσιμα συνηθίζεται να αποκαλούμε το LNG (φυσικό αέριο), το υγραέριο (LPG), την μεθανόλη, τα βιοκαύσιμα και το υδρογόνο σαν τις πιο υποσχόμενες λύσεις. Μεταξύ των νέων τεχνολογιών, θεωρείται ότι τα συστήματα μπαταριών, τα fuel cells και η (υποβοηθούμενη) αιολική πρόωση διαθέτουν πολύ θετικές προοπτικές για εφαρμογές στα πλοία της ναυτιλίας μικρών αποστάσεων ή και ποντοπόρων.

### 2.3.1 Φυσικό Αέριο (LNG)

Το φυσικό αέριο είναι ένα από τα ανερχόμενα ναυτιλιακά καύσιμα με αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα για τα πλοία. Το κύριο συστατικό του είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και είναι το καύσιμο με την χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και την μεγαλύτερη δυνατότητα για μείωση των ρύπων  $\text{CO}_2$ , κατά περίπου 26% σε σχέση με το μαζούτ. Επιπρόσθετα, δεν περιέχει θείο, συνεπώς συμμορφώνεται με τους ισχύοντες κανονισμούς της MARPOL για τον περιορισμό εκπομπής ρύπων <sup>[6]</sup>.

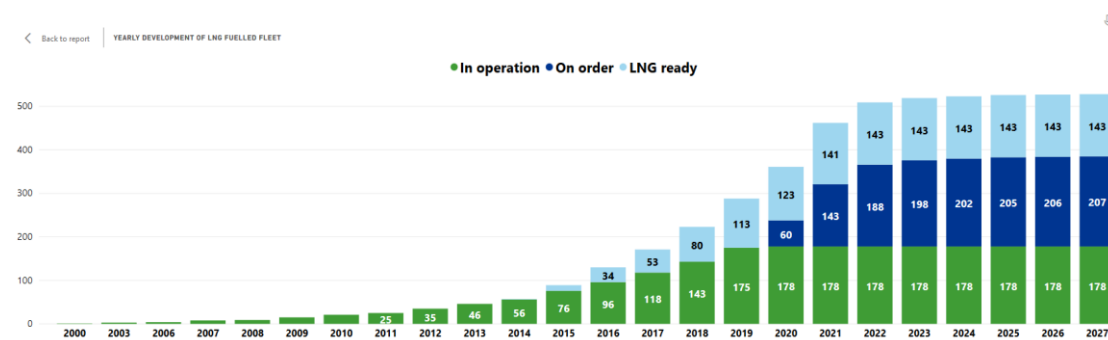
Η αποθήκευση και μεταφορά του περιλαμβάνει κάποιες ιδιαιτερότητες καθώς το σημείο βρασμού του, στους  $-163\text{ }^\circ\text{C}$ , στο 1 bar απόλυτης πίεσης, κάνει απαραίτητες τις δεξαμενές με μόνωση. Η μόνωση ωστόσο, δεν μπορεί να αποτρέψει το φαινόμενο **Boil-Off Gas** (BOG), κατά το οποίο μικρό μέρος του LNG εξατμίζεται με φυσικό τρόπο αυξάνοντας ταυτόχρονα τον όγκο περιεχομένου και συνεπώς την πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής. Τότε, καθίσταται απαραίτητη η ανάγκη εξισορρόπησης της πίεσης στο εσωτερικό της δεξαμενής. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως στα πλοία με διάφορους τρόπους: είτε αναφλέγοντας το BOG σε μηχανή διπλού καυσίμου, αν το πλοίο βρίσκεται εν πλω, είτε αναφλέγοντας το σε ειδική μονάδα στο πλοίο (gas combustion unit), είτε επαναφέροντας το στην πρότερη, υγρή μορφή με την μέθοδο επανυγροποίησης (reliquefaction). Για την μέθοδο αυτή ωστόσο απαιτείται ειδικός εξοπλισμός όπως ειδικά φυγοκεντρικά κομπρεσέρ, κρυογενικοί εναλλάκτες, κλπ. Επίσης, ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι οι δεξαμενές μεγαλύτερου μεγέθους. Σε κάθε περίπτωση, αρκετά LNG carriers νέας γενιάς, κατασκευάζονται με σύστημα επανυγροποίησης.

Το LNG υπερέχει κατά 18% έναντι του μαζούτ σε Θερμογόνο δύναμη ( $48.6\text{ MJ/ Kg}$ ) αλλά ταυτόχρονα υστερεί σε ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας (43% λιγότερη του μαζούτ). Σχηματικά, μπορούμε να υπολογίσουμε ότι οι κυλινδρικές δεξαμενές LNG καταλαμβάνουν 3- 4 φορές περισσότερο όγκο απ' ό τι οι δεξαμενές πετρελαίου μαζούτ, για το την ίδια προσφερόμενη ενέργεια<sup>[6]</sup>. Σχετικά με την νομοθεσία που διέπει τα πλοία που χρησιμοποιούν

LNG ως καύσιμο, ο IMO από την 1/1/2017 έχει θέσει σε ισχύ τον International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code).

Η τιμή του LNG παγκοσμίως έχει διακυμάνσεις, ανάλογα την τοποθεσία. Ειδικότερα, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα τελευταία χρόνια ότι το LNG σημειώνει τις χαμηλότερες τιμές συγκρινόμενο με ισόποση δυναμική ενέργεια που προσφέρουν άλλα είδη καυσίμων, όπως το μαζούτ (ιξώδους 380 cSt) και το Marine Gas oil (με 0,1% περιεκτικότητα σε θείο) [6].

Από αρχές του 2000, το LNG ως καύσιμο, χρησιμοποιείται και από άλλα είδη πλοίων πέραν των LNG carriers που το χρησιμοποιούσαν από την δεκαετία του '50. Σύμφωνα με την ηλεκτρονική πλατφόρμα του DNV, Alternative Fuels Insights (AFI), τον Μάρτιο του 2020, βρισκόταν σε υπηρεσία 178 πλοία που χρησιμοποιούσαν LNG ως καύσιμο και 60 ακόμα, είχαν παραγγελθεί σε ναυπηγεία. Από το σχήμα 2.2.1, μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι από το 2021 θα υπάρχει αύξηση των παραγγελιών για πλοία που κινούνται με LNG, αύξηση η οποία θα διατηρηθεί ως το 2027.



**Σχήμα 2.3.1** Πρόβλεψη για αριθμό πλοίων με LNG ως καύσιμο έως το 2027. Πηγή: DNV, AFI web portal (Μάρτιος 2020).

Μια σημαντική παράμετρος που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη για το LNG είναι τα λιμάνια και η διαθεσιμότητα του για προμήθεια από τα πλοία. Δεδομένου ότι η χρησιμοποίηση του πριν το 2010 κινούταν σε χαμηλά επίπεδα, οι εγκαταστάσεις και τα πλοία μεταφοράς του στα λιμάνια ήταν σχεδόν ανύπαρκτα. Τα τελευταία χρόνια όμως και μέχρι το 2023 αναμένεται να υπάρξει αύξηση των παραδόσεων πλοίων μεταφοράς LNG καυσίμου (LNG bunker vessels). Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την ετήσια παγκόσμια έκθεση 2019 της Διεθνούς Ένωσης Φυσικού Αερίου (International Gas Union, IGU), η παγκόσμια παραγωγή LNG διαμορφώθηκε σε 393 εκατομμύρια μετρικούς τόνους τον Φεβρουάριο του 2019 και αναμένεται αύξηση περίπου 22% μέχρι το τέλος του 2024 [14].

Τέλος, ως προς το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα, το LNG θεωρείται στις μέρες μας το «καθαρότερο» ορυκτό καύσιμο, με τις εκπομπές ρύπων SOx και NOx να κινούνται σε



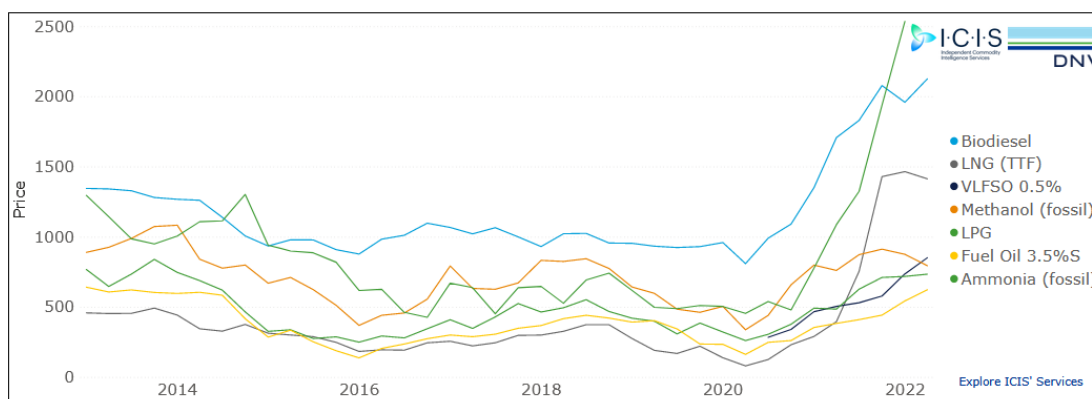
πολύ χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, στην αξιολόγηση δυνατότητας μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η απελευθέρωση μεθανίου κατά την καύση. Ενδεικτικά να αναφερθεί ότι οι ναυτικοί κινητήρες LNG, κύκλου Otto, χαμηλής πίεσης συμμορφώνονται με τις τελευταίες απαιτήσεις του IMO (Tier III) για τα τον περιορισμό εκπομπών NOx, χωρίς επιπρόσθετη εγκατάσταση συστήματος δέσμευσης ρύπων [6].

### 2.3.2 Υγραέριο (LPG)

Το υγροποιημένο αέριο (Liquefied Petroleum Gas, LPG) είναι εξ' ορισμού, οποιοδήποτε μείγμα προπάνιου και βουτανίου σε υγρή μορφή. Στις ΗΠΑ, ο όρος «LPG» συνδέεται γενικά με προπάνιο. Ειδικά μείγματα βουτανίου και προπάνιου χρησιμοποιούνται για την επίτευξη επιθυμητών χαρακτηριστικών κορεσμού, πίεσης και θερμοκρασίας. Το προπάνιο υπό συνθήκες περιβάλλοντος είναι σε αέρια μορφή με σημείο ζέσεως -42 °C. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υγρό με εφαρμογή μέτριας πίεσης (8,4 bar στους 20 °C). Το βουτάνιο μπορεί να βρεθεί σε δύο μορφές: n-βουτάνιο ή iso-βουτάνιο, τα οποία έχουν σημείο ζέσεως -0,5 °C και -12 °C, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι και τα δύο ισομερή έχουν υψηλότερα σημεία βρασμού από το προπάνιο, μπορούν να ρευστοποιηθούν σε χαμηλότερη πίεση. Όσον αφορά τη χερσαία αποθήκευση, οι δεξαμενές προπάνιου εφοδιασμένες με ασφαλιστικές βαλβίδες ώστε να διατηρείται η πίεση κάτω από τα 25 bar. Τέλος, οι δεξαμενές αποθήκευσης υγραερίου είναι μεγαλύτερες από τις δεξαμενές πετρελαίου, λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας του υγραερίου [6].

Το υγραέριο μπορεί να παραχθεί από δύο κύριες πηγές: α) ως υποπροϊόν της παραγωγής πετρελαίου υγραερίου και αερίου ή β) ως υποπροϊόν απόσταξης πετρελαίου. Επίσης, είναι δυνατή η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές, για παράδειγμα ως υποπροϊόν της ανανεώσιμης παραγωγής ντίζελ. Το 2019, υπήρξαν τρεις νέες παραγγελίες για πολύ μεγάλα πλοία μεταφοράς υγραερίου (Very Large Gas Carriers, VLGC) που κινούνται με υγραέριο, ενώ 4 πλοία μεταφοράς υγραερίου μετασκευάστηκαν ώστε να κινούνται και τα ίδια με υγραέριο το 2019 [6].

Ως προς την τιμή αγοράς, τα τελευταία χρόνια και κυρίως από το 2015, το LPG εξελίσσεται σε ένα «ελκυστικό» καύσιμο με κοντινότερο ανταγωνιστή στις τιμές τις βαριές αποστάξεις του πετρελαίου.



**Σχήμα 2.3.2** Δολαριακές τιμές ναυτιλιακών καυσίμων 2013-2022 σε ισοδύναμους τόνους MGO. Πηγή: DNV, AFI web portal (Σεπτέμβριος 2022).

Ως προς την επάρκεια του, σύμφωνα με την ετήσια έκθεση της Παγκόσμιας Ένωσης LPG (World LPG Association) για το 2019, η ετήσια παραγωγή υγραερίου ανήλθε στους 318 εκατομμύρια τόνους. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα του υγραερίου ενισχύθηκε σε ΗΠΑ, Κίνα και σε χώρες της Μέσης Ανατολής ενώ η παραγωγή ενισχύθηκε κατά 10% σε ΗΠΑ και Καναδά. Η αύξηση στην παραγωγή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις κρύες καιρικές συνθήκες που επικράτησαν στις συγκεκριμένες περιοχές. Όσον αφορά την κατανάλωση, η Ασία έχει το μεγαλύτερο μερίδιο. Επιπλέον, υπολογίζεται ότι με τους τωρινούς ρυθμούς παραγωγής η ζήτηση για την ναυτιλία μπορεί άνετα να καλυφθεί έως το 2030, με την προϋπόθεση ότι θα αυξάνεται με αργούς ρυθμούς αρχικά και θα παραμένει σε μεσαία επίπεδα <sup>[6]</sup>.

Σχετικά με το τις επιπτώσεις του υγραερίου στο περιβάλλον, η καύση του LPG έχει ως αποτέλεσμα εκπομπές CO<sub>2</sub> που είναι χαμηλότερες κατά 16% από εκείνες που παράγει το μαζούτ. Στον υπολογισμό του πλήρους κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής καυσίμων, το ποσό εξοικονόμησης CO<sub>2</sub> ανέρχεται σε περίπου 17%. Από την άλλη πλευρά όμως, έχουμε το ενδεχόμενο αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη μέσω των αέριων θερμοκηπίου. Τα αέρια που προέρχονται από το Βουτάνιο και το Προπάνιο εκλύουν περίπου 3-4 φορές περισσότερη ενέργεια από το CO<sub>2</sub>. Αυτό το γεγονός, πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη όταν υπάρχει το ενδεχόμενο άκαυστου υγραερίου (ολίσθηση LPG). Αντίθετα, η καύση του υγραερίου εξαλείφει ουσιαστικά τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>). Επιπλέον, αναμένεται επίσης να μειώσει σημαντικά τα σωματίδια εκπομπών (Particulate Matter, PM). Η δε εκπομπή οξειδίων του Αζώτου (NO<sub>x</sub>) εξαρτάται κατά περίπτωση <sup>[6]</sup>.

Για παράδειγμα, ένας αργόστροφος (2-χρονος) κινητήρας ντίζελ που χρησιμοποιεί LPG σαν καύσιμο, μπορεί να μειώσει τις εκπομπές NO<sub>x</sub> κατά 10 - 20% συγκρινόμενος με την καύση μαζούτ. Ωστόσο, για να είναι σε θέση να ανταποκριθεί στα κριτήρια επιπέδου III για εκπομπών NO<sub>x</sub> (Tier 3), θα πρέπει να εφοδιαστεί με συστήματα δέσμευσης ρύπων (EGR ή

SCR). Αντίθετα, ένας μεσόστροφος-πολύστροφος κινητήρας, κύκλου Otto και LPG καυσίμου, αναμένεται να έχει πιο παρουσιάζει σημαντική μείωση εκπομπών NO<sub>x</sub>, ακόμα και κάτω από τα όρια που ορίζει ο Κώδικας NO<sub>x</sub> στο επίπεδο III (Tier 3)<sup>[6]</sup>.

Υπάρχουν τρεις εφαρμογές του LPG ως καύσιμο πλοίου:

- 1) σε δίχρονο κινητήρα κύκλου ντίζελ
- 2) σε ένα τετράχρονου κινητήρα κύκλου Otto με ελαφρά καύση
- 3) σε αεριοστρόβιλο.

Επί του παρόντος, μόνο ένα μοντέλο δίχρονου κινητήρα ντίζελ είναι εμπορικά διαθέσιμο, η σειρά ME-LGI της MAN. Απ' την άλλη πλευρά, η Wärtsilä προσφέρει μια εναλλακτική τεχνολογία που έγκειται στην εγκατάσταση ενός μετασχηματιστή αερίου που μετατρέπει το υγραέριο και τον ατμό, σε μεθάνιο μέσω της ανάμειξή τους με CO<sub>2</sub> και υδρογόνο. Αυτό το μίγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κανονικό κινητήρα αερίου ή διπλού καυσίμου.

Σχετικά με την αποθήκευση του, το υγραέριο μπορεί να αποθηκευτεί υπό πίεση ή να ψυγμένη μορφή. Μειονέκτημα αποτελεί το ότι τόσο το πλοίο ανεφοδιασμού (LPG bunker barge), όσο και το πλοίο που παραλαμβάνει υγραέριο ως καύσιμο, πρέπει να φέρουν απαραίτητο εξοπλισμό και εγκαταστάσεις για ασφαλή ανεφοδιασμό. Η πιο ενδεδειγμένη λύση είναι δεξαμενές υγραερίου υπό πίεση, λόγω απλότητας της και επειδή το σκάφος μπορεί εφοδιάζεται με καύσιμα ευκολότερα, χρησιμοποιώντας είτε δεξαμενές υπό πίεση ή ημι-ψυχόμενες δεξαμενές.

Τέλος, το κόστος εγκατάστασης μηχανημάτων στο πλοίο που σχετίζονται με το υγραέριο (π.χ. κινητήρας, δεξαμενές καυσίμου, δίκτυα) είναι περίπου το μισό σε σχέση με το Φυσικό Αέριο (LNG) συγκρίνοντας δεξαμενές αποθήκευσης τύπου «C.» Ο λόγος δεν είναι άλλος από το ότι δεν απαιτούνται ειδικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις (κρυογονικές) δεξαμενές του LNG. Εναλλακτικά, το υγραέριο μπορεί να αποθηκευτεί και σε δεξαμενές χαμηλής πίεσης έχοντας χαμηλή θερμοκρασία.

### **2.3.3 Μεθανόλη (Methanol)**

Η Μεθανόλη, με τη χημική δομή CH<sub>3</sub>OH, είναι η απλούστερη αλκοόλη με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και ταυτόχρονα υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδρογόνο, από οποιοδήποτε υγρό καύσιμο. Σε θερμοκρασία 25 °C και υπό πίεση 1 atm, είναι ένα ελαφρύ, άχρωμο, εύφλεκτο και τοξικό υγρό με χαρακτηριστική οσμή, που θυμίζει αυτήν της αιθανόλης, αλλά είναι ελαφρά γλυκύτερη από αυτήν. Επίσης, εμφανίζεται σε υγρή μορφή μεταξύ 176 - 338 Kelvin (- 93 ° C έως + 65 ° C) σε ατμοσφαιρική πίεση. Επιπρόσθετα,

αποτελεί βασικό στοιχείο εκατοντάδων βασικών χημικών προϊόντων που συμβάλλουν στην καθημερινότητά μας όπως: οικοδομικά υλικά, πλαστικές συσκευασίες, βαφές και επιστρώσεις. Τέλος, χρησιμοποιείται και ως καύσιμο μεταφοράς <sup>[6] [15]</sup>.

Η μεθανόλη μπορεί να παραχθεί από αρκετές διαφορετικές πρώτες ύλες, όπως το φυσικό αέριο ή το κάρβουνο αλλά και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως το «μαύρο λικέρ» (black liquor) που παράγεται από εργοστάσια πολτοποίησης χαρτιού, αποψίλωση δασών ή γεωργικά απόβλητα, ακόμη και απευθείας από το CO<sub>2</sub> που συλλέγεται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα πια, η μεθανόλη παράγεται βιομηχανικά από μονοξειδίο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο <sup>[6] [15]</sup>. Η μεθανόλη που παράγεται από εξαερίωση του άνθρακα (κάρβουνο) βασίζεται μεν σε μία φθηνή και ευρέως διαθέσιμη πρώτη ύλη, αλλά οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) είναι σχεδόν διπλάσιες από εκείνες του φυσικού αερίου. Λόγω της πυκνότητας της και της χαμηλότερης θερμογόνου δύναμης (19,5 MJ/ kg), οι δεξαμενές αποθήκευσης μεθανόλης θα πρέπει να έχουν περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερο μέγεθος από τις δεξαμενές πετρελαίου για να επιτευχθεί το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο. Η μεθανόλη έχει σημείο ανάφλεξης 11 - 12 ° C και θεωρείται καύσιμο χαμηλής πυκνότητας. Όσον αφορά τους κανονισμούς στη ναυτιλία, διέπεται από τον IGF Code που είναι υποχρεωτικός για καύσιμα με χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης. Μπορεί επίσης να μετατραπεί σε διμεθυλαιθέρα (DME, κατά ISO), που χρησιμοποιείται ως καύσιμο για κινητήρες ντήζελ <sup>[6]</sup>.

Ως προς την τιμή αγοράς, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα 2.3.2 παραπάνω, η μεθανόλη (παραγόμενη από φυσικό αέριο), το 2022, εμφανίζεται να είναι το 5<sup>ο</sup> πιο ακριβό καύσιμο. Το κόστος της μεθανόλης στο συγκεκριμένο διάγραμμα, υπολογίζεται από το spot κόστος φορτίων σε φορτηγίδες για αποθηκευτικές εγκαταστάσεις στο Ρότερνταμ της Ολλανδίας, απ' όπου η μεθανόλη διακινείται, προερχόμενη από τις χώρες εξαγωγής της όπως η Ρωσία, οι ΗΠΑ, χώρες της Μέσης Ανατολής και Λατινικής Αμερικής καθώς και η Ισημερινή Γουινέα <sup>[13]</sup>.

Σχετικά με την διανομή της μεθανόλης στα πλοία, μπορεί να γίνει είτε με φορτηγά, είτε με μικρά πλοία ανεφοδιασμού (bunker barges). Για παράδειγμα, στο λιμάνι του Γκέτεμποργκ, η εταιρία “Stena Lines” έχει κατασκευάσει ειδικό σταθμό ανεφοδιασμού για το επιβατηγό της πλοίο «M/S Stena Germanica», το οποίο εκτελεί δρομολόγια μεταξύ Γκέτεμποργκ και Κιέλου. Στη Γερμανία, τον Αύγουστο του 2017, δημιουργήθηκε η πρώτη πλήρης αλυσίδα υποδομής για την μεθανόλη. Από την παραγωγή, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ανεφοδιασμό μέσω πλοίων, μέχρι την κατανάλωση σε σύστημα κυψελών καυσίμου στο επιβατηγό πλοίο, εγχώριων πλοίων, “M/S Innogy” <sup>[6]</sup>.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις της μεθανόλης στο περιβάλλον, η καύση της σε κινητήρα MEK έχει αποδειχθεί ότι σε υπολογισμό κύκλου ζωής “tank-to-propeller”, μειώνει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά περίπου 10% σε σύγκριση με το πετρέλαιο. Αν εξεταστεί ο πλήρης κύκλος ζωής («well-to-tank» και «tank-to-propeller»), υπολογίζοντας την μεθανόλη παραγόμενη από φυσικό αέριο, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι ισοδύναμες ή ελαφρώς υψηλότερες από τις αντίστοιχες εκπομπές πετρελαιοειδών καυσίμων. Ως προς τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>), είναι σχεδόν μηδενικές και ικανοποιούν τα κριτήρια της MARPOL για τις εκπομπές ρύπων. Αναμένεται επίσης ότι τα σωματίδια εκπομπών σωματιδίων εκπομπών (Particulate Matter, PM) θα είναι σημαντικά χαμηλότερα με αυτό τον τύπο καυσίμου. Η μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> διαφέρει μεταξύ κινητήρων και χρησιμοποιούμενων καυσίμων αλλά δεν είναι εφικτό να επιτευχθούν επιδόσεις χαμηλότερες των προδιαγραφών Tier III χωρίς εγκατάσταση συστημάτων δέσμευσης ρύπων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση δίχρονου ντήζελ με μεθανόλη, οι εκπομπές NO<sub>x</sub> αναμένεται να είναι περίπου 30% χαμηλότερες σε σύγκριση με μαζούτ καύσιμο (HFO). Επιπλέον, στην περίπτωση τετράχρονου κινητήρα, κύκλου Otto, η αναμενόμενη μείωση είναι περίπου 60%, αλλά οπωσδήποτε εκτός ορίων Tier III <sup>[6]</sup>.

Καταλήγοντας, αξίζει να αναφερθεί, ότι όπως ισχύει και στο υγραέριο (LPG), υπάρχει διαθεσιμότητα μόνο ενός κινητήρα διπλού καυσίμου (dual fuel), του ME-LGI της MAN που έχει εγκατασταθεί ως τώρα μόνο σε δεξαμενόπλοια μεταφοράς μεθανόλης. Επιπλέον, Το κόστος εγκατάστασης συστήματος μεθανόλης υπολογίζεται περίπου ως το 1/3 του κόστους ενός συστήματος φυσικού αερίου. Ο κύριος λόγος είναι η χρησιμοποίηση απλούστερων υλικών για την αποθήκευση και την διαχείριση του καυσίμου έναντι εξειδικευμένου εξοπλισμού που απαιτεί το φυσικό αέριο (δεξαμενές υπό πίεση, πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, κλπ.).

### **2.3.4 Βιοκαύσιμα (Biofuels)**

Βιοκαύσιμα (Biofuels) ονομάζονται τα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα τα οποία προέρχονται από τη βιομάζα, το βιοδιασπώμενο δηλαδή κλάσμα προϊόντων ή αποβλήτων διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Τα βιοκαύσιμα που προορίζονται για τα πλοία είναι κυρίως το Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), ο Μεθυλεστέρας λιπαρών οξέων (Fatty Acid Methyl Ester, FAME) και το υγροποιημένο βιοαέριο (Liquefied Biogas, LBG) <sup>[6]</sup>.

Η χρήση βιοκαυσίμων στη ναυτιλία στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στον στόχο για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG), τουλάχιστον 50% έως το 2050, σύμφωνα με τον στόχο που έχει θέσει ο IMO. Παρότι η χρήση τους δεν μειώνει άμεσα τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, το CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται από την καύση βιοκαυσίμων θεωρείται ως μέρος του

φυσικού κύκλου του CO<sub>2</sub> κατά τον οποίο συλλέγεται ισοδύναμη ποσότητα CO<sub>2</sub> από την ανάπτυξη των φυτών. Η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου από τα βιοκαύσιμα, αναλύοντας τους κύκλους ζωής τους, ποικίλει από 19- 88%. Διάφορες μελέτες έδειξαν ότι τα βιώσιμα βιοκαύσιμα αποτελούν μια από τις ελάχιστες επιλογές για την ποιοτικό ναυτιλία για επίτευξη αυτού του στόχου. Το HVO έχει μεγαλύτερες δυνατότητες μείωσης εκπομπών από το FAME και η μείωση εκπομπών συνολικά στον κύκλο ζωής του, φθάνει το 50% έναντι του συμβατικού ντήζελ <sup>[6]</sup>.

Απ' την άλλη πλευρά, υπάρχουν και μειονεκτήματα στην χρησιμοποίηση βιοκαυσίμων, όπως η μικρότερη θερμογόνος δύναμη σε σχέση με το συμβατικό ντήζελ, οι περιορισμοί του στην μακρόχρονη αποθήκευση και ο αυξημένος κίνδυνος διάβρωσης στο σύστημα καυσίμου, των φίλτρων καθώς και στα στεγανωτικά υλικά. Επίσης, ορισμένα βιοκαύσιμα (π.χ. FAME) παρουσιάζουν υγροσκοπικότητα, γεγονός που αυξάνει τις πιθανότητες ανάπτυξης μικροβίων και αλλοίωσης <sup>[16]</sup>. Ως προς την τιμή αγοράς των βιοκαυσίμων, προς το παρόν είναι ακριβότερα από τα συμβατικά καύσιμα με την διαθεσιμότητα των τιμών να είναι σχετικά περιορισμένη, δεδομένης της χαμηλής ζήτησης στη ναυτιλιακή αγορά.

Όσον αφορά τις υποδομές παραγωγής βιοκαυσίμων, υπάρχουν αρκετές ελλείψεις σε παγκόσμια κλίμακα ωστόσο, είναι διαθέσιμες σε ορισμένα λιμάνια της Ολλανδίας, της Αυστραλίας και της Νορβηγίας. Σχετικά με τον εφοδιασμό HVO, συνήθως μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το υφιστάμενο σύστημα καυσίμου του πλοίου. Αντίθετα ο FAME, παρουσιάζει μειονεκτήματα ιζηματοποίησης όταν έρθει σε επαφή με υλικά όπως ο χαλκός, ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος. Τέτοια υλικά συνήθως δεν εγκαθίσταται στην Προωστήρια εγκατάσταση, αλλά σε βοηθητικά μηχανήματα και εξαρτήματα, όπως εναλλάκτες θερμότητας και επιστόμια. Τέλος, το υγροποιημένο βιοαέριο (LBG) που παράγεται από φυσικό αέριο (LNG) μπορεί να διοχετευθεί σε πλοία χρησιμοποιώντας τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις φυσικού αερίου, που συνεχώς επεκτείνονται <sup>[6]</sup> <sup>[16]</sup>.

Παράλληλα, το ISO 8217:2017, το οποίο καθορίζει την ποιότητα των βιοκαυσίμων για την ναυτιλία, απαιτεί ορισμένα κριτήρια για την χρήση τους από ναυτικούς κινητήρες. Το κυριότερο είναι η αποτροπή πρόσμιξης του FAME με συμβατικές αποστάξεις πετρελαίου, όπως το DMA (Marine Gas Oil, MGO) ή ακόμα και με βαρύτερα κλάσματα. Για αυτό το λόγο, η 6<sup>η</sup> έκδοση ISO 8217 εισάγει την νέα σειρά αποστάξεων πετρελαίου DF (Distillate FAME) όπως τα DFA, DFZ και DFB. Η σειρά αυτή επιτρέπεται να περιέχει FAME έως 7% κάτ. όγκο <sup>[12]</sup>.

Σχετικά με την προσαρμογή ναυτικών κινητήρων ώστε να μπορούν να καταναλώσουν βιοκαύσιμα, η καύση FAME συνεπάγεται με επιπλέον 5% επιβάρυνση του κόστους της μηχανής ενώ για το HVO δεν υπάρχει κάποιο επιπλέον κόστος. Όσον αφορά το LBG, εάν σε

ένα πλοίο υπάρχει εγκατεστημένος LNG κινητήρας, δεν υπεισέρχονται επιπλέον έξοδα για την καύση LBG βιοκαυσίμου. Γενικά, τα έξοδα για την αποθήκευση και διαχείριση των βιοκαυσίμων επί του πλοίου δεν διαφέρουν από εκείνα για τα συμβατικά καύσιμα. Ωστόσο, η χρήση τους, συνιστά περαιτέρω εκπαίδευση του πληρώματος και διαφορετικές πρακτικές που ενδέχεται να επιφέρουν επιπλέον κόστη για τον πλοιοκτήτη <sup>[6]</sup>.

### 2.3.5 Υδρογόνο (Hydrogen)

Το υδρογόνο (H<sub>2</sub>) σε «κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος», δηλαδή σε θερμοκρασία 25°C και υπό πίεση 1 atm, είναι ένα άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό αέριο. Η χρήση του σε πλοία, συνιστά αποθήκευση είτε ως κρυογόνο υγρό, ως συμπιεσμένο αέριο ή ως χημικά δεσμευμένο. Παρουσιάζει πολύ χαμηλό σημείο βρασμού, στους -253 ° C σε πίεση 1 bar. Η υγροποίηση του είναι εφικτή σε θερμοκρασίες έως - 240 ° C, γεγονός που σημαίνει ότι τα εξαρτήματα του συστήματος αποθήκευσης και τα υλικά καταπονούνται από μεγάλες τάσεις, ενώ μία ακόμη πρόκληση αποτελεί και η εκρηκτική του φύση. Σημειωτέο είναι δε, ότι η αποθήκευση και χρήση H<sub>2</sub>, εκτός από τον IGF Code (International Code for Safety of Ships using Gases or Other Low-flashpoint Fuels), διέπεται και από τον κανονισμό II-1/ 55 της SOLAS για «εναλλακτικές διατάξεις και σχεδίαση» για λόγους ασφαλείας.

Η θερμογόνος δύναμη (120 MJ/ kg) του υδρογόνου είναι περίπου τριπλάσια εκείνης του μαζούτ (HFO) ενώ η ογκομετρική πυκνότητα του (71 kg/ m<sup>3</sup>) είναι μόλις το 7% του μαζούτ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, πενταπλάσιο όγκο ενεργειακού περιεχόμενου σε σχέση με το μαζούτ. Επιπλέον, όταν αποθηκεύεται ως συμπιεσμένο αέριο, ο όγκος του είναι περίπου 10 - 15 φορές μεγαλύτερος (ανάλογα με την πίεση 300 έως 700 bar) της αντίστοιχης ποσότητας ενέργειας σε μαζούτ <sup>[6]</sup>.

Ως προς την παραγωγή του, μπορεί να παραχθεί από διάφορες ενεργειακές πηγές, όπως ηλεκτρόλυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ή μέσω μετατροπής φυσικού αερίου. Στις μέρες μας, το 95% του υδρογόνου παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο (68%), το πετρέλαιο (16%) και ο άνθρακας (11%). Παράλληλα, μόνο το 5% της συνολικής παραγωγής προέρχεται από ηλεκτρόλυση. Στον τομέα μεταφορών, η πιο δημοφιλής μέθοδος παραγωγής είναι μέσω φυσικού αερίου. Συνολικά, σε παγκόσμια κλίμακα, παράγονται ετησίως πάνω από 50 εκατ. τόνοι υδρογόνου.

Όσον αφορά την τιμή αγοράς του, παρουσιάζει διακυμάνσεις ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής του. Ειδικότερα, η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος καθορίζει την παραγωγή μέσω ηλεκτρόλυσης και αντίστοιχα, η τιμή του φυσικού αερίου την παραγωγή μέσω μετατροπής φυσικού αερίου. Επιπλέον, το κόστος μεταφοράς, η συμπίεση και η υγροποίηση (εάν

εφαρμοσθούν) είναι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τελική τιμή αγοράς. Ενδεικτικά να αναφερθεί ότι το μέσο κόστος για υδρογόνο που παράγεται από μετατροπή φυσικού αερίου ή βιοαερίου, συμπεριλαμβανομένης της συμπίεσης, αποθήκευσης και μεταφοράς, κυμαίνεται περίπου στα 4,1 δολάρια/ kg, που είναι ισοδύναμο με 1,370 δολάρια/ τόνο μαζούτ <sup>[6]</sup>.

Η χρησιμοποίηση του (υγροποιημένου) υδρογόνου στη ναυτιλία είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο ωστόσο, οι χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) και NO<sub>x</sub>, έχουν στρέψει ορισμένους πλοιοκτήτες στην εξέταση αυτής της επιλογής καυσίμου για το μέλλον. Για παράδειγμα, το 2020, η Γαλλική ναυτιλιακή “CMA-CGM” με την σύμπραξη της “Energy Observer R&D” άρχισαν να εξετάζουν τις δυνατότητες του υδρογόνου για την πρόωση των πλοίων <sup>[17]</sup>. Ωστόσο, τα δίκτυα και τα πλοία διανομής, δεδομένης της χαμηλής ζήτησης, είναι επίσης περιορισμένα.

Όσον αφορά τις προωστήριες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν υδρογόνο, περιλαμβάνουν κυρίως τις κυψέλες καυσίμου (Παρά. 2.3.5) με βαθμό απόδοσης 50-60% και Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (MEK) με β.α περίπου 40-50%. Το πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των MEK, είναι αφενός ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης και αφετέρου, οι σχεδόν μηδενικοί ρύποι SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και των σωματιδίων εκπομπών (Particulate Matter, PM). Ωστόσο, το κόστος απόκτησης και συντήρησης των MEK υδρογόνου δεν διαφέρει από εκείνο μιας MEK συμβατικού καυσίμου (200-500 \$/ kW) ενώ απ’ την άλλη πλευρά, το κόστος τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου μπορεί να κυμανθεί από 2,200- 5600 δολάρια/ kW εγκατεστημένης ηλεκτρικής ενέργειας <sup>[6][18]</sup>.

### **2.3.6 Αιολική πρόωση (*Wind assisted propulsion*)**

Η αιολική πρόωση προφανώς και δεν είναι μία νέα τεχνολογία, αν και τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί σημαντικά. Ήδη από το 1920, Γερμανός μηχανικός Anton Flettner ανέπτυξε την ιδέα κατά την οποία οι γιγάντιοι περιστρεφόμενοι κύλινδροι τοποθετούνταν στα καταστρώματα του πλοίου, και χρησιμοποιώντας το φαινόμενο Magnuss, περιστρέφονται δημιουργώντας διαφορά πίεσης και μετατρέποντας την σε ενέργεια ώστε να κινείται το πλοίο. Επί του παρόντος, χρησιμοποιείται σαν υποβοήθηση της μηχανικής πρόωσης έχοντας σαν στόχο την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Διάφορες τεχνολογίες είναι σε στάδιο μελέτης ή δοκιμής και κάποιες άλλες είναι διαθέσιμες για εγκατάσταση σε πλοία. Η αιολικά υποβοηθούμενη πρόωση μπορεί να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων κατά 10-30% σε υπάρχοντα πλοία και έως 50% σε νεότευκτα, σε συνδυασμό με καύσιμα χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα <sup>[19]</sup>.



Οι διαθέσιμες τεχνολογίες για πλοία, με κινητήρια δύναμη τον άνεμο συνοψίζονται παρακάτω:

1. Τα παραδοσιακά γνωστά σε όλους μας, ιστιοφόρα.
2. Hard Sail (rigid sail) σταθερά ιστία σε συνδυασμό με ηλιακούς συλλέκτες για πρόσθετη ισχύ πρόωσης.



**Σχήμα 2.3.3** Τεχνολογία τύπου Hard Sail εγκατεστημένη σε bulk carrier πλοίο. Πηγή: [www.e-mc2.gr](http://www.e-mc2.gr)

3. Flettner Rotor ή Rotor Sails όπου χρησιμοποιούνται περιστρεφόμενοι κύλινδροι, ενεργοποιούμενοι από μοτέρ, οι οποίοι λειτουργούν με χαμηλή ισχύ, εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο Magnuss ώστε να δημιουργείται διαφορά πίεσης αέρα και άρα πρόωση του σκάφους.



**Σχήμα 2.3.4** Τεχνολογία τύπου Flettner rotor εγκατεστημένη σε general cargo πλοίο. Πηγή: DNV

4. Suction Wings, μια τεχνολογία που στηρίζεται επίσης στο φαινόμενο Magnuss όμως αποτελείται από σταθερά πτερύγια αναρρόφησης.
5. Στροβιλομηχανές, δηλαδή θαλάσσιες προσαρμοσμένες Α/Γ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας και ώσης.

6. Kites στην πλώρη του σκάφους όπου τοποθετείται ένα ιστίο έτσι ώστε με την δύναμη του ανέμου να υπάρχει βοηθητική πρόωση και μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Η ενεργοποίηση και ο έλεγχος του πανιού γίνονται από ηλεκτρικά μέσα είναι εγκατεστημένα στο πλοίο.



**Σχήμα 2.3.5** Τεχνολογία τύπου Kite εγκατεστημένη σε general cargo πλοίο. Πηγή: DNV

7. Hull Form ο επανασχεδιασμός της γάστρας του σκάφους ώστε να επιτυγχάνεται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ώση από την δύναμη του ανέμου.

Μερικές από τις παραπάνω τεχνολογίες είναι αποτέλεσμα μακροπρόθεσμης εξέλιξης, που προέρχεται από ιστιοπλοϊκούς αγώνες, όπως το America's Cup (τεχνολογία hard sail). Παράλληλα, η ποντοπόρος ναυτιλία υπήρξε ο λόγος που παλαιότερες τεχνολογίες, όπως η Flettner rotor αλλά και σχετικά νεότερες, όπως η Kite, άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε πλοία έχοντας ως στόχο την μείωση κατανάλωσης καυσίμου <sup>[6]</sup>.

Ως προς το κόστος, πέραν του κόστους εγκατάστασης, η αιολικά υποβοηθούμενη πρόωση πλεονεκτεί διότι, ανεξαρτήτως τεχνολογίας, επιφέρει σχεδόν μηδαμινό κόστος συντήρησης. Για παράδειγμα, η δαπάνη ενέργειας για την κίνηση των μοτέρ στην Flettner rotor τεχνολογία και το κόστος των ηλεκτρονικών μέσων ελέγχου του πανιού, στην Kites τεχνολογία, θεωρείται ασήμαντη σε σχέση με την παραγόμενη αιολική ισχύ και την οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου που προσφέρει. Σε κάθε περίπτωση, οι πλόες του πλοίου και η πλεύση σε γεωγραφικές περιοχές με αιολικό δυναμικό καλής ποιότητας παίζουν σημαντικό ρόλο στην τελική απόφαση για επενδύσεις προς αυτή την κατεύθυνση.

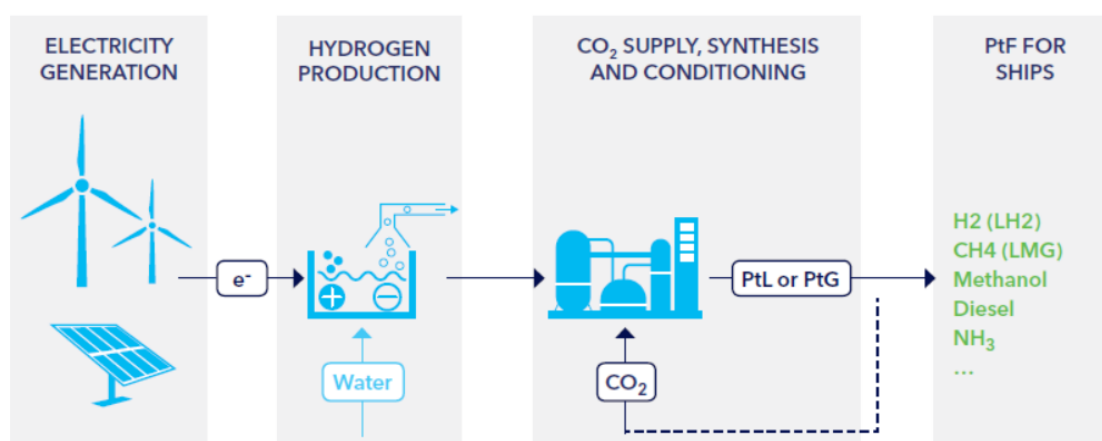
### **2.3.7 Συνθετικά καύσιμα (Synthetic fuels)**

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερο στη ναυτιλία, εντείνονται οι προσπάθειες για υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων με καύσιμα χαμηλών ή μηδενικών ρύπων. Η

προσπάθεια αυτή ωστόσο συνδέεται άρρηκτα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, μετατρέποντας δηλαδή την αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική ή πυρηνική ενέργεια. Επιπλέον, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή αέριων ή υγρών «φορέων ενέργειας». Οι φορείς αυτοί περιλαμβάνουν μια οικογένεια καυσίμων που παράγονται από το νερό, τον άνθρακα ή το άζωτο και είναι γνωστά ως Power to Fuel/Gas/Liquid (PtoF/ PtoG/ PtoL), e-καύσιμα, ηλεκτροκαύσιμα ή συνθετικά καύσιμα. Επίσης, σε αρκετές περιπτώσεις ο όρος «ηλεκτροκαύσιμα» χρησιμοποιείται για να υποδείξει την κατηγορία συνθετικών καυσίμων, που παράγονται από φορείς ενέργειας με μηδενικές εκπομπές άνθρακα, όπως το ντίζελ, το μεθάνιο, τη μεθανόλη, την αμμωνία και το υδρογόνο [6].

Αναντίρρητα όμως, η αποκλειστικότητα χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) ως «πρώτη ύλη» για την δημιουργία συνθετικών καυσίμων, αποτελεί απρόβλεπτο παράγοντα, εξαρτώμενο από τις καιρικές συνθήκες. Η αστάθμητη παραγωγή, θα συντελούσε στην δημιουργία επιπλέον μονάδων ΑΠΕ και συνεπώς στην ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας, ώστε να εξασφαλισθεί η απρόσκοπτη διαθεσιμότητα συνθετικών καυσίμων σε περιόδους αυξημένης ζήτησης ενέργειας, που οι καιρικές συνθήκες δεν θα ήταν ιδανικές για παραγωγή μέσω ΑΠΕ. Επομένως, οι συνθήκες αυτές οδήγησαν στην εμφάνιση φορέων ενέργειας, όπως το υδρογόνο και η αμμωνία, στη γραμμή παραγωγής των συνθετικών καυσίμων [6].

#### Power to Liquid (PtL), Power to Gas (PtG) = Power to Fuel (PtoF)



**Σχήμα 2.3.6** Γραμμή παραγωγής συνθετικών καυσίμων για πλοία, με χρήση ΑΠΕ και υδρογόνου.  
Πηγή: DNV

Για παράδειγμα, το Υδρογόνο, το οποίο παράγεται είτε από ανανεώσιμες πηγές, είτε από ηλεκτρόλυση, μπορεί να αποτελέσει τη βασική πρώτη ύλη για αποθήκευση ενέργειας

μηδενικής περιεκτικότητας σε άνθρακα, σε αέρια ή υγρή μορφή. Ωστόσο, η προσθήκη Άνθρακα ή Αζώτου στο υδρογόνο, οδηγεί σε παραγωγή καυσίμων που έχουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες με εκείνες των κοινών ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, η χρήση Αζώτου αντί άνθρακα, θα έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή Αμμωνίας (NH<sub>3</sub>). Γενικά, οι διαδικασίες χημικών συνθέσεων με απώτερο σκοπό την παραγωγή συνθετικών καυσίμων είναι γνωστές ως διαδικασίες «Power-to-Fuel (PtoF)» (από ηλεκτρική ενέργεια σε καύσιμο). Ειδικότερα, αναλύονται περαιτέρω ανάλογα τη μορφή του παραγόμενου καυσίμου σε “Power-to-liquid (PtoL)” (από ηλεκτρική ενέργεια σε υγρό καύσιμο) και “Power-to-Gas (PtoG)” (από ηλεκτρική ενέργεια σε αέριο καύσιμο). Τα καύσιμα που παράγονται με διαδικασίες PtoF θα παίζουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον, καθώς η ναυτιλία βαδίζει προς το 2050. Το 2050, αναμένεται να υπάρχουν περίπου 102 εκατ. τόνοι καυσίμων παγκοσμίως, παραγόμενων με διαδικασίες PtoF που θα συμπεριλαμβάνουν χρήση βιοκαυσίμων και καυσίμων χωρίς άνθρακα, όπως το υδρογόνο και η αμμωνία <sup>[20]</sup>.

Καύσιμα	Ενεργειακή αξία	Ποσότητα
	EJ/ έτος	(σε εκατ. τόνους πετρελαίου, FoE)
<b>Χωρίς άνθρακα (carbon neutral)</b>	4.3	102
<b>Φυσικό αέριο (LNG)</b>	2.5	60
<b>Ηλεκτροκίνηση</b>	0.6	13
<b>HFO/ MGO</b>	3.7	89
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>11,1</b>	<b>264</b>

**Σχήμα 2.3.7** Σενάριο πρόσμιξης καυσίμων το 2050 για την εκπλήρωση του στόχου που έχει θέσει ο IMO για την μείωση των αέριων θερμοκηπίου (GHG). Πηγή DNV

Σχετικά με την τιμή αγοράς, η ηλεκτρική ενέργεια παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής των συνθετικών καυσίμων. Συγκεκριμένα, το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας στην διαδικασία PtoF (Power to fuel) ξεπερνάει το 50% το τελικού κόστους. Το κόστος ποικίλει βέβαια ανάλογα τον τρόπο παραγωγής των συνθετικών καυσίμων. Ενδεικτικά, οι κλίμακες τιμών για καύσιμα με την PtoF διαδικασία έχουν εκτιμηθεί από διάφορες μελέτες <sup>[20]</sup>. Μέχρι το 2030, το ανανεώσιμο υδρογόνο εκτιμάται ότι θα κοστίζει περίπου 1.000 ~ 2.000 δολάρια ανά ισοδύναμο τόνο πετρελαίου, το υγροποιημένο βιοαέριο (από μεθάνιο) 1.500 ~ 2.500 δολάρια ανά ισοδύναμο τόνο πετρελαίου, το συνθετικό πετρέλαιο 1.700 ~ 2.700 δολάρια/ ισοδύναμο τόνο πετρελαίου και η συνθετική μεθανόλη περίπου 1.700 ~ 2.500 δολάρια/ ισοδύναμο τόνο πετρελαίου <sup>[6]</sup>. Για λόγους σύγκρισης, υπενθυμίζεται ότι οι σημερινές τιμές συμβατικών καυσίμων, παρατίθεται στο Σχήμα 2.3.1.

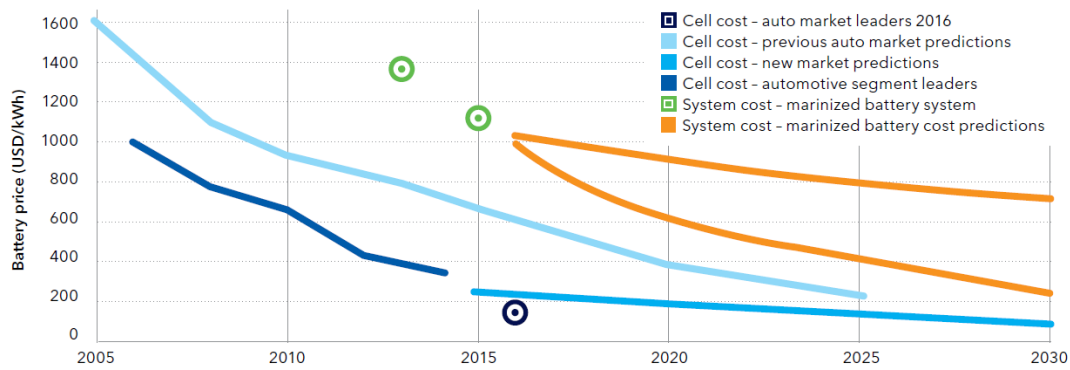
Είναι πρόδηλο ότι με βάση το παρόν αλλά και το παρελθόν, το κόστος των συνθετικών καυσίμων είναι αρκετά υψηλό και το σενάριο πρόσμιξης με τα υφιστάμενα καύσιμα μοιάζει πιο πιθανό ανάλογα τις συνθήκες και τις πλόες που εκτελεί ένα πλοίο.

Όσον αφορά τις αποκλειστικές υποδομές συνθετικών καυσίμων σήμερα, εξαιτίας του υψηλού κόστους και της χρονοβόρας ανέγερσης μια μονάδας νέου καυσίμου, είναι στην ουσία ανύπαρκτες. Τα συνθετικά καύσιμα που παράγονται με PtoF διαδικασία, χρησιμοποιούν τα υφιστάμενα δίκτυα συμβατικών καυσίμων. Τα καύσιμα που δυνητικά θα εξυπηρετούν την ποντοπόρο ναυτιλία, θεωρείται απίθανο να είναι πολλών ειδών και αντίστοιχα να χρησιμοποιούν υποδομές διαφορετικού τύπου. Αντίθετα, στην παράκτια ναυτιλία, τα δεδομένα είναι διαφορετικά και ένα τέτοιο σενάριο είναι πιθανό. Σύμφωνα με τον DNV, ο στόχος του IMO για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, θα επιτευχθεί με τα υφιστάμενα καύσιμα και τα συνθετικά καύσιμα πιθανόν να παίξουν ρόλο στην ναυτιλία από το 2030 και ύστερα <sup>[20]</sup>.

### **2.3.8 Μπαταρίες (Batteries)**

Οι μπαταρίες και γενικότερα η υβριδική πρόωση, αποτελούν μία ακόμη επιλογή για την πρόωση των πλοίων. Απ' τη μία πλευρά, τα ηλεκτρικά συστήματα μπαταριών πλεονεκτούν έναντι άλλων μέσων πρόωσης ως προς την απόδοση τους, την ασφάλεια στη διαχείριση αλλά και την αποτελεσματικότητά τους. Ωστόσο, η αποκλειστική χρήση μπαταριών για την πρόωση των πλοίων είναι κάτι που απέχει αρκετά ακόμη από το να αποτελέσει μια τεχνικά και οικονομικά εφικτή επιλογή. Παρ' όλα αυτά, τον Δεκέμβριο του 2019, η ναυτιλιακή εταιρία Maersk, εγκατέστησε δοκιμαστικά στο containership «Maersk Cape Town», μια συστοιχία μπαταριών χωρητικότητας 600 kWh, προκειμένου να βελτιώσει την απόδοση των ηλεκτρογεννητριών του πλοίου, μειώνοντας παράλληλα τις εκπομπές CO<sub>2</sub> <sup>[22]</sup>.

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια, το κόστος των μπαταριών έχει μειωθεί αισθητά. Η μείωση οφείλεται κυρίως στην αυξημένη παραγωγή μπαταριών που προορίζονται για τον τομέα των μεταφορών (π.χ. υβριδικά αυτοκίνητα) αλλά και των ηλεκτρονικών ειδών. Από το 2016, το κόστος των μπαταριών ιόντων Λιθίου (Li-ion) έχει μειωθεί κατά το ήμισυ. Σημαντική μείωση σημειώνεται και στο κόστος των ολοκληρωμένων συστημάτων μπαταριών, τα οποία εφαρμόζονται στην ναυτιλία. Έως το 2030, αναμένεται να υπάρξουν περαιτέρω μειώσεις στο κόστος <sup>[6]</sup>.



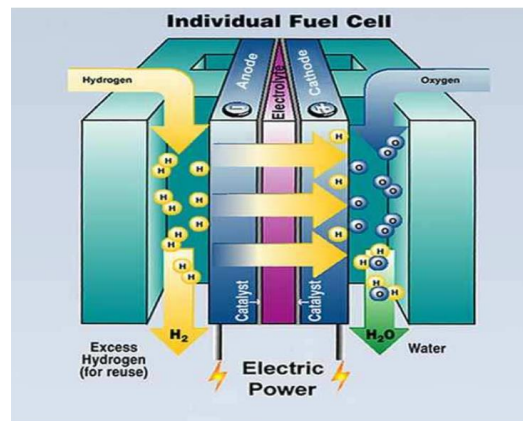
**Σχήμα 2.3.8** Πρόβλεψη κόστους εγκατάστασης μπαταριών (\$/ kWh) μεταξύ 2005 ~ 2030. Πηγή: DNV

Όσον αφορά τις υποδομές, οι απαιτήσεις για τις μπαταρίες περιορίζονται σε σταθμούς φόρτισης των οποίων το μέγεθος θα ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος των μπαταριών. Για παράδειγμα, η φόρτιση μπαταριών μεγέθους 1000 kWh (ενέργεια που αντιστοιχεί σε 100 λίτρα πετρελαιοειδούς καυσίμου) για 30 λεπτά, απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια 2000 kW. Όμως, η φόρτιση της ίδιας μπαταρίας για 10 μόνο λεπτά αυξάνει τις ενεργειακές απαιτήσεις στα 6000 KW. Εύκολα λοιπόν γίνεται αντιληπτό ότι το φορτίο στους σταθμούς φόρτισης μπορεί να πολλαπλασιαστεί, οδηγώντας σε αναζήτηση επιπλέον πηγών ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι οι μπαταρίες είναι μέσα αποθήκευσης συνεχούς ρεύματος (DC). Αυτό επιδρά θετικά στην συνδεσιμότητα και την «επικοινωνία» των μπαταριών με τους σταθμούς φόρτισης της στεριάς. Με άλλα λόγια, σε περίπτωση αντικατάστασης των μπαταριών λόγω φθοράς ή εκσυχρονισμού, οι σταθμοί φόρτισης θα είναι σε θέση να ανταποκριθούν στο ρόλο τους χωρίς επιπλέον τεχνικές παρεμβάσεις <sup>[6]</sup>.

Σχετικά με το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, οι μπαταρίες έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους αλλά το μεγάλο ερωτηματικό που πλανάται είναι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την παραγωγή τους. Διάφορες μελέτες για τον κύκλο ζωής των μπαταριών, έχουν δείξει ότι η παραγωγή τους είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα. Ωστόσο, μελέτη ενός Νορβηγικού NOx fund, για την περίπτωση της ναυτιλίας, απέδειξε ότι η χρησιμοποίηση μπαταριών επιφέρει, εν τέλει, όφελος στο περιβάλλον. Οι μελέτες αφορούσαν την εφαρμογή υβριδικής πρόωσης σε υποστηρικτικό πλοίο πλατφόρμας εξόρυξης (Platform Supply Vessel, PSV) και ένα ηλεκτροκινούμενο, μικρό επιβατηγό σκάφος. Σχετικά με την απόρριψη των μπαταριών μετά τη χρήση, η ανακύκλωση τους είναι απολύτως εφικτή και εφαρμόσιμη ολόένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια. Διάφορες μελέτες επικεντρώνονται στην εξαγωγή και επαναχρησιμοποίηση του αλουμινίου και του χαλκού που εμπεριέχονται στις μπαταρίες, καθώς αποτελούν τα πολυτιμότερα υλικά στην σύνθεση μιας μπαταρίας <sup>[6]</sup>.

### 2.3.9 Κυψέλες καυσίμου (Fuel cells)

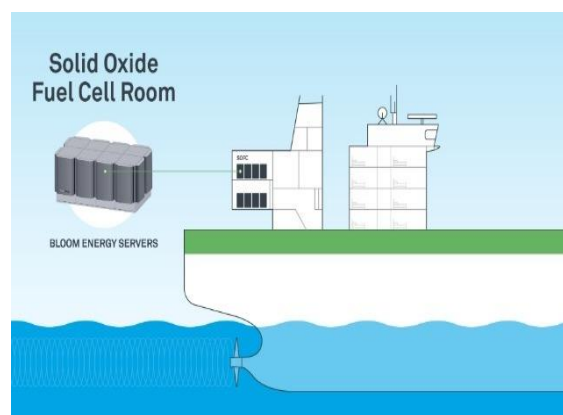
Η κυψέλη καυσίμου είναι ένας ηλεκτροχημικός μετατροπέας ενέργειας, ο οποίος όταν τροφοδοτείται με καύσιμο και ένα μέσο οξείδωσης, μετατρέπει την χημική ενέργεια των δύο σε ηλεκτρική, θερμική και άλλα προϊόντα αντίδρασης. Τα χρησιμοποιούμενα μέσα είναι το υδρογόνο (καύσιμο) και ο αέρας ή καθαρό οξυγόνο (μέσο οξείδωσης). Έχουν ως κύριο πλεονέκτημα την υψηλή ενεργειακή απόδοση που φτάνει το 60%, ανάλογα το είδος κυψέλης και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο [23].



Σχήμα 2.3.9 Αναπαράσταση Κυψέλης Καυσίμου, Πηγή:

Μελέτη του DNV εκ μέρους του EMSA [24], έδειξε ότι στη ναυτιλία μπορούν να αναπτυχθούν οι παρακάτω 3 τεχνολογίες κυψελών καυσίμου:

- 1) Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (solid oxide fuel cell, SOFC) που λειτουργεί σε θερμοκρασίες 500- 1000 °C .



Σχήμα 2.3.10 Αναπαράσταση συστήματος κυψέλης σταθερού οξειδίου σε πλοίο. Πηγή: <https://www.maritime-executive.com>

- 2) Κυψέλη πολυμερισμένης μεμβράνης χαμηλής θερμοκρασίας (low-temperature proton exchange membrane fuel cell, LT-PEMFC) που λειτουργεί σε θερμοκρασίες 60- 80 °C .
- 3) Κυψέλη πολυμερισμένης μεμβράνης υψηλής θερμοκρασίας (high-temperature proton exchange membrane fuel cell, HT-PEMFC) που λειτουργεί σε θερμοκρασίες 120- 200 °C.

Οι κυψέλες πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM) έχουν αναπτυχθεί τόσο, ώστε το μέγεθος τους να είναι συγκρίσιμο με μηχανές αυτοκινήτων. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις για την πρόωση ενός πλοίου. Επιπρόσθετα, αποτελούνται από εύκαμπτα υλικά που μπορούν να ανταπεξέλθουν στα μεταβαλλόμενα μηχανικά φορτία και συνεπώς να συμβάλλουν στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Απ' την άλλη πλευρά, οι κυψέλες στερεού οξειδίου (SOFC) θα πρέπει να εγκατασταθούν σε υβριδικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας παράλληλα στη στεριά τεχνολογίες εξομάλυνσης για την ζήτηση κατά τις ώρες αιχμής, ώστε να μπορέσουν να αποτελέσουν λύση για τη ναυτιλία.

Οι κυψέλες καυσίμου, όλων των ειδών, χρησιμοποιούν συνήθως καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο καθώς και αμμωνία. Εκτός από το υδρογόνο και την αμμωνία όμως, χρησιμοποιούνται και μετατροπείς καυσίμων (fuel reformers) για την μετατροπή άλλων καυσίμων όπως το φυσικό αέριο, η μεθανόλη και το ντήζελ σε συμβατό καύσιμο με τις κυψέλες καυσίμου. Κατά την διαδικασία μετατροπής καυσίμου υπάρχει περίπτωση να υπάρξει μια μικρή κατανάλωση καυσίμου ωστόσο, η συντριπτική πλειοψηφία της ποσότητας χρησιμοποιείται στην ηλεκτροχημική διαδικασία που λαμβάνει χώρα εντός της κυψέλης. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η εξάλειψη των εκπομπών αερίων <sup>[6]</sup>.

Ως προς το κόστος εγκατάστασης, από το 2022, αναμένεται να ξεκινήσει μαζική παραγωγή κυψελών καυσίμου, γεγονός που θα οδηγήσει σε πτώση του σχετικού κόστους. Όσον αφορά το κόστος συντήρησης, δεν μπορεί να υπάρξει ακόμη απάντηση καθώς οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούν να συγκριθούν με κινητήρες ΜΕΚ, μόνο στην περίπτωση που η μακροπρόθεσμη αντοχή των συστημάτων κυψελών καυσίμου φτάσει στα επίπεδα των ΜΕΚ. Προς το παρόν, κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό και είναι ο κύριος λόγος που οι εφαρμογές συστημάτων κυψελών καυσίμου περιορίζονται σε εγκαταστάσεις μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος 100 kW. Παρ' όλα αυτά, το τωρινό κόστος κυμαίνεται από 2,600 ~ 5,600 δολάρια/ kW εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος, ποσό που θεωρείται αρκετά υψηλό <sup>[6]</sup>.

Σχετικά με την διέπουσα νομοθεσία, προς το παρόν, δεν έχουν θεσπιστεί επίσημοι κανονισμοί από τον IMO παρά μόνον τεχνικοί κανονισμοί/ καθοδήγηση από ορισμένους νηογνώμονες ([βλ. 2.1.3 Οι Νηογνώμονες για τις νέες τεχνολογίες χαμηλών ρύπων](#)).



Περαιτέρω ανάπτυξη της νομοθεσίας αναφορικά με τις κυψέλες καυσίμου αναμένεται να υπάρξει από το 2028 και να ενταχθεί ειδικό εδάφιο στον IGF Code.

### **2.3.10 Αμμωνία (Ammonia)**

Η αμμωνία (NH<sub>3</sub>) είναι ανόργανη, δυαδική χημική ένωση που παράγεται από υδρογόνο και άζωτο. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, διαδικασία γνωστή και ως «carbon capture and sequestration» (CCS). Παρ' όλα αυτά, η αμμωνία, στις μέρες μας, παράγεται κυρίως από υδρογόνο που έχει ως βάση τα ορυκτά καύσιμα. Ως φορέας ενέργειας μπορεί, με την ανάπτυξη υφιστάμενων τεχνολογιών, να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου ή ακόμα και σε μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK). Οι Kang και Holbrook <sup>[25]</sup> σε μελέτη τους, αξιολόγησαν τις δυνατότητες εισαγωγής ελαφρών οχημάτων, κινουμένων με αμμωνία στον Αμερικανικό τομέα μεταφορών έως το 2040 με σκοπό την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG).

Όσον αφορά την ναυτιλία, η Wärtsillä, τον Ιούνιο του 2020, ξεκίνησε δοκιμές καύσης αμμωνίας ώστε να βοηθήσει στην προετοιμασία της χρήσης της ως καύσιμο που μπορεί να συμβάλει στη μείωση, τόσο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία, όσο και από τη διαδικασία παραγωγής άλλων μορφών ενέργειας. Βάσει των αρχικών αποτελεσμάτων, οι δοκιμές θα συνεχιστούν τόσο σε κινητήρες διπλού καυσίμου, όσο και σε κινητήρες με ανάφλεξη από σπινθήρα <sup>[26]</sup>. Από το 2022, αναμένεται να πραγματοποιηθούν δοκιμές σε πλοία σε συνεργασία με πλοιοκτήτες και ενδεχομένως με επιχειρήσεις ενέργειας. Απ' την άλλη πλευρά, Η MAN Energy Solutions έχει υπό εξέλιξη έναν κινητήρα αμμωνίας ευελπιστώντας ότι θα είναι έτοιμος ως το 2024.

Εντούτοις, δεν θα πρέπει να παραλειφθεί το γεγονός ότι η αμμωνία διαθέτει μια σειρά αμφιλεγόμενων ιδιοτήτων που χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης όπως π.χ. το μισό σχεδόν ενεργειακό περιεχόμενο σε σχέση με το ντήζελ (22,5 MJ/Kg έναντι 45,6 MJ/ Kg του ντήζελ), αυξημένες εκπομπές CO<sub>2</sub> και NO<sub>x</sub> κατά την καύση, κ.α. <sup>[26][27]</sup>.

Ως προς το κόστος της, η αμμωνία αναμένεται να είναι ελαφρώς ακριβότερη (περίπου 450\$ ανά ισοδύναμο τόνο MGO) σε σχέση με τα άλλα εναλλακτικά καύσιμα, όπως το LNG (υγροποιημένο φυσικό αέριο), ή την μεθανόλη (βλ. [Σχήμα 2.3.2](#)).

## *Περιγραφή μεθοδολογίας AKZ και εφαρμογές στη ναυτιλία*

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ) είναι μια μέθοδος η οποία έχει αναπτυχθεί κυρίως για να αξιολογηθεί η περιβαλλοντική επίπτωση της παραγωγής προϊόντων και των διαδικασιών που τη συνοδεύουν. Ταυτόχρονα, η AKZ είναι μια από τις πληρέστερες μεθόδους αξιολόγησης της βιωσιμότητας μιας παραγωγικής διαδικασίας και ως τέτοια περιγράφεται συνοπτικά. Γενικά, η AKZ απογράφει όλες τις διαδικασίες και τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται σε μια παραγωγική διαδικασία. Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να αφορούν μεταφορά των πρώτων υλών, μηχανουργικές κατεργασίες, συναρμολόγηση, συσκευασία τελικού προϊόντος κλπ. Για κάθε μία από τις διαδικασίες υπολογίζεται η ενεργειακή κατανάλωση και η χρήση άλλων πόρων, καθώς και η περιβαλλοντική επιβάρυνση που προξενεί. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται το σύνολο της κατανάλωσης ενέργειας, πόρων και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που συνεπάγεται η παραγωγή του προϊόντος.

Εν συνεχεία, η AKZ επεκτείνεται στην **κατανάλωση ενέργειας** και στην περιβαλλοντική επιβάρυνση που συνεπάγεται η χρήση του προϊόντος, καθώς και η αποσυναρμολόγηση ή ανακύκλωσή του κατά τη λήξη της ωφέλιμης ζωής του. Είναι προφανές ότι η μέθοδος AKZ αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο αξιολόγησης της αειφορίας (sustainability) μιας διαδικασίας ή επένδυσης. Μεταξύ δύο εναλλακτικών δυνατοτήτων, αυτή που συνεπάγεται μικρότερη συνολική κατανάλωση και επιβάρυνση του περιβάλλοντος σε όλο τον κύκλο ζωής, είναι η βέλτιστη από πλευράς αειφορίας <sup>[28]</sup>.

### 3.1 Μεθοδολογία και στάδια της AKZ (Γενικά)

Η μεθοδολογία που ορίζει το πλαίσιο εφαρμογής της AKZ έχει οροθετηθεί από τον Οργανισμό Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (Society of Environmental Toxicology and Chemistry - SETAC), ο οποίος είναι ένας παγκόσμιος οργανισμός με γραφεία στο Βέλγιο, στην Φλόριντα των ΗΠΑ καθώς και στην Αυστραλία. Ο οργανισμός αυτός ορίζει την AKZ ως: «μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από τη χρήση ενέργειας και υλικών καθώς και από τη χρήση των αποβλήτων, αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων».

Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας: εξαγωγή και επεξεργασία των πρώτων υλών, κατασκευή, συσκευασία, μεταφορά και διανομή, χρήση, επαναχρησιμοποίηση, συντήρηση, ανακύκλωση και τελική απόρριψη.

Πρότυπο ISO	Αντικείμενο
ISO 14040-43	Εργαλείο (ολοκληρωμένο σύστημα) περιβαλλοντικής διαχείρισης με περιγραφή των σταδίων που εφαρμόζονται για την πλήρη διεξαγωγή μιας AKZ.
ISO 14040	Αρχές και οριοθέτηση συστήματος
ISO 14041	Προσδιορισμός σκοπού και στόχου και απογραφή δεδομένων
ISO 14042	Αποτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life cycle impact assessment)
ISO 14043	Ερμηνεία αποτελεσμάτων

**Πίνακας 3.1.1** Τα συστήματα ποιότητας ISO που αφορούν την AKZ στην βιομηχανία.

Το πλαίσιο μεθοδολογίας της AKZ προτείνεται από τον SETAC και περιλαμβάνει **τέσσερα (4) βασικά στάδια**:

#### 1) Προσδιορισμό του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης.

Κατά τη διεξαγωγή μιας AKZ είναι απαραίτητο να ορισθούν με σαφήνεια η επιδίωξη της μελέτης, ο σκοπός και το αντικείμενό της. Το αντικείμενο της μελέτης καθορίζει

τα όρια του υπό μελέτη συστήματος, τις απαιτήσεις δεδομένων, τις υποθέσεις και τους περιορισμούς.

## **2) Καταγραφή δεδομένων.**

Η ποιότητα των δεδομένων καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την αξιοπιστία της AKZ. Οι πηγές, λοιπόν, των δεδομένων πρέπει να αναφέρονται με λεπτομέρεια, να επιλέγονται με προσοχή και να ελέγχονται για την αξιοπιστία τους.

## **3) Εκτίμηση των επιπτώσεων.**

Η εκτίμηση των επιπτώσεων αποτελεί μια ποσοτική και συνάμα ποιοτική διαδικασία. Προκύπτει από την απογραφή των δεδομένων και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει και να εκτιμήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

## **4) Εκτίμηση βελτιώσεων.**

Στο στάδιο της εκτίμησης βελτιώσεων, τα αποτελέσματα της ανάλυσης χρησιμοποιούνται ως βάση για τη λήψη αποφάσεων που θα ωφελήσουν τόσο τη βιομηχανία όσο και το περιβάλλον.

Η AKZ περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος από τη δημιουργία του μέχρι και την τελική του διάθεση.

Τα ζητήματα του κύκλου ζωής που μελετώνται κατά τη διεξαγωγή μιας AKZ είναι:

1. Σκοπός για τον οποίο εφαρμόζεται η AKZ,
2. Ο λεπτομερής καθορισμός της AKZ καθώς και της χρήσης προϊόντος
3. Καθορισμός λειτουργικής μονάδας
4. Ορισμός και περιγραφή των ορίων του συστήματος
5. Ποιοτικές προδιαγραφές των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην AKZ
6. Υποθέσεις, Περιορισμοί και απαιτήσεις για ακριβή ερμηνεία,
7. Τελική έκθεση <sup>[29]</sup>.

### **3.1.1 Σημαντικοί παράμετροι της AKZ**

Ο **σκοπός και το πλαίσιο** της AKZ είναι σημαντικό να καθορίζεται με σαφήνεια γιατί επηρεάζει αναπόφευκτα την έκταση της μελέτης καθώς και το κόστος της. Επιπλέον, οι όποιες απλοποιήσεις και παραδοχές θα πρέπει να προσδιορίζονται ώστε να μην επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της AKZ.

Επιπλέον, μία σημαντική παράμετρος είναι η ο **καθορισμός λειτουργικής μονάδας**. Ως λειτουργική μονάδα ορίζεται ένα μέτρο που επιτρέπει την σύγκριση δύο διαφορετικών συστημάτων. Για παράδειγμα, η λειτουργική μονάδα σε μια AKZ που αφορά τις

θαλάσσιες μεταφορές – παράδειγμα πολύ κοντινό στην παρούσα εργασία - θα μπορούσε να είναι οι εκπομπές Διοξειδίου Άνθρακα σε g CO<sub>2</sub>/ ναυτικό μίλι, συγκρίνοντας διαφορετικά καύσιμα από το εκάστοτε πλοίο.

Επιπρόσθετα, πρέπει να καθοριστούν τα **όρια του συστήματος** (threshold points). Τα όρια του συστήματος μπορούν αφορούν χρονικά, γεωγραφικά ή άλλο είδος ορίου και διακριτοποιούνται ανάλογα με το υπό μελέτη σύστημα.

Ακόμα, η εγκυρότητα και η **ποιότητα δεδομένων** καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα της μελέτης. Τέλος, τηρουμένων των ανωτέρω διασφαλίζουμε ένα ακριβέστερο αποτέλεσμα που θα μας βοηθήσει να εξάγουμε ένα σωστό συμπέρασμα, επομένως θα επιτευχθεί ο αντικειμενικός σκοπός της μελέτης AKZ που εφαρμόσαμε.

### 3.1.2 Σφάλματα και πρόληψη σφαλμάτων στην AKZ

Τα σφάλματα στην AKZ είναι μια παράμετρος οπου παρά το γεγονός ότι μπορεί να είναι σημαντικού βαθμού, αγνοείται. Για να κατηγοριοποιήσουμε καλύτερα τα σφάλματα στην AKZ, θα πρέπει να τα διακριτοποιήσουμε, ως προς τις εξής δύο παραμέτρους:

- ❖ την **πηγή** του σφάλματος
- ❖ τον **τύπο** τους σφάλματος.

Πηγές Αβεβαιότητας	Τύποι Αβεβαιότητας	Παραδείγματα
<b>Δεδομένα</b>	1. Διασπορά δεδομένων 2. Ανακρίβειες στις πηγές δεδομένων 3. Αδιευκρίνιστα δεδομένα	1. Η κατανάλωση καυσίμου διαφέρει από κινητήρα σε κινητήρα ακόμα και σε όμοιους κινητήρες. Επίσης, ο χρόνος εναλλαγής από το ένα καύσιμο στο άλλο εξαρτάται και από περιβαλλοντικούς παράγοντες. 2. Σε AKZ που αφορά AKZ για εξόρυξη Φυσικού Αερίου στην Βόρεια Θάλασσα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούσαν εξόρυξη ΦΑ στην Βόρεια Αμερική το 2006.
<b>Επιλογή</b>	Αστάθεια δεδομένων σε σχέση με τον σκοπό και το αντικείμενο της AKZ	Επιλογή παραδειγμάτων που βασίζονται σε μ.ο. αποτελεσμάτων αντί για το καλύτερο αποτέλεσμα.
<b>Σχέσεις (μαθηματικοί τύποι)</b>	Λάθη στην εισαγωγή τους στο λογισμικού	Οι «ρουτίνες» για την αναστροφή πινάκων μπορεί να είναι μην είναι ακριβείς σε όλους τους χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους.

**Πίνακας 3.1.2** Πίνακας συνηθισμένων σφαλμάτων σε μια AKZ.

Γενικά, προτείνονται τρεις μέθοδοι περιορισμού των σφαλμάτων:

- i. Ο «Επιστημονικός» τρόπος (scientific way), που περιλαμβάνει ακριβέστερη καταγραφή δεδομένων, καλύτερη μοντελοποίηση και ακριβέστερη περιγραφή του προβλήματος.
- ii. Ο «Κοινωνικός» τρόπος (social way), ο οποίος προλαμβάνει την αβεβαιότητα του σφάλματος μέσω συζητήσεων με τους ενδιαφερόμενους και τους συμμετέχοντες στην μελέτη. Ο κύριος στόχος είναι μια επικρατούσα άποψη που θα οδηγήσει στην ασφαλέστερη συλλογή δεδομένων και τον καλύτερο προσδιορισμό του σκοπού και του αντικειμένου της ανάλυσης.
- iii. Τον Στατιστικό τρόπο (statistical way), που στοχεύει να συμπεριλάβει την αβεβαιότητα του σφάλματος στην ανάλυση, παρά να την εξαλείψει. Για παράδειγμα, η μέθοδος μπορεί να περιλαμβάνει διακύμανση στις τιμές των παραμέτρων ή ακόμα και ανάλυση διαφόρων σεναρίων <sup>[30]</sup>.

### **3.2 Παραδείγματα εφαρμογών της AKZ**

Η μέθοδος AKZ έχει μπορεί να έχει διάφορα πεδία εφαρμογών. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα παρακάτω:

- ❖ **Στα ΚΑΥΣΙΜΑ**, μέσω της ανάλυσης «από το πηγάδι εξόρυξης, στην δεξαμενή» (**well-to-tank**): μέσω της ανάλυσης «από το πηγάδι εξόρυξης, στην δεξαμενή» μπορεί κανείς να υπολογίσει την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για την παραγωγή και διακίνηση του καυσίμου (well-to-tank, wtt).
- ❖ **Στις ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ**, μέσω της ανάλυσης «από την δεξαμενή καυσίμου, στους τροχούς» (**tank-to-wheel**): Σε αυτή την ανάλυση, μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή ρύπων από τα οχήματα, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση από το κάθε όχημα (tank-to-wheel ή ttw).

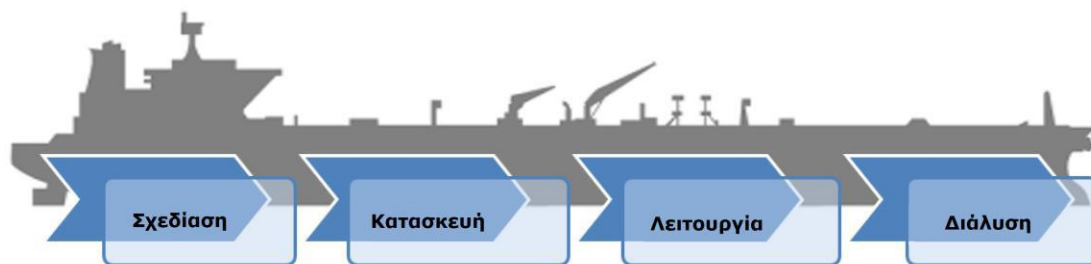
Ένα ενδεικτικό, αν και εξειδικευμένο, παράδειγμα των δυνατοτήτων της μεθόδου AKZ είναι η ανάλυση «από το πηγάδι στον τροχό» (**well-to-wheel**) που αφορά στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας εναλλακτικών τεχνολογικών επιλογών οχημάτων. Με άλλα λόγια, μέσω του συνδυασμού των παραπάνω αναλύσεων, μπορούμε να δούμε συνολικά αποτελέσματα και να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα, τόσο για το στάδιο παραγωγής, όσο και για το στάδιο χρήσης του οχήματος.

- ❖ Στη **ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**, μέσω της ανάλυσης “**cradle-to-grave**”: Με τον όρο **cradle** (=λίκνο) ορίζεται ως η απαρχή ενός προϊόντος (π.χ. εξόρυξη) και με τον όρο “**grave**” (=τάφος) ορίζεται η φάση της απόρριψής του. Η ανάλυση “**cradle-to-grave**” στις περισσότερες περιπτώσεις συμπεριλαμβάνει και την ανάλυση “**cradle-to-gate**” (από την εξόρυξη έως την πύλη του εργοστασίου), όπου αναλύεται μερικώς, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος, από την εξόρυξη έως την φάση της παραγωγής (π.χ. στο εργοστάσιο) αλλά πριν τη μεταφορά του στον καταναλωτή.

### 3.2.1 Εφαρμογή της AKZ στο πλοίο

Στην παρούσα παράγραφο, αναφέρονται επιγραμματικά τα στάδια του κύκλου ζωής ενός πλοίου. Δεν θα πρέπει να αμεληθούν τα διάφορα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τα πλοία, ενσωματωμένα σε οικονομικούς και τεχνικούς κύκλους, σύμφωνα με τα ναυπηγεία και τις επισκευαστικές ζώνες και τις θαλάσσιες μεταφορές. Έτσι, ο κύκλος ζωής των πλοίων αναλύεται σε διαδοχικά ή επικαλυπτικά στάδια, όπως είναι οι φάσεις σχεδιασμού, κατασκευής, εκμετάλλευσης και διάλυσης. Αναμφισβήτητα, η βελτιστοποίηση στον τρόπο χρήσης των πρώτων υλών και της κατανάλωσης ενέργειας οδηγούν στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στην φάση της κατασκευής και λειτουργίας αντίστοιχα. Τέλος, μέσω της εφαρμογής της ισχύουσας νομοθεσίας (π.χ. Ship Recycling Regulation, EU SRR) και της κερδοφορίας (διάλυση πλοίου έναντι αντιτίμου ανά μετρικό τόνο Lightship), οδηγούμαστε στην διάλυση και συνεπώς στην ανακύκλωση υλικών <sup>[31]</sup>.

Σχετικά με την εφαρμογή στο πλοίο, η AKZ περιλαμβάνει όλα τα στάδια: από την αρχική *σχεδίαση*, την *κατασκευή*, την *ωφέλιμη χρήση* του πλοίου και τέλος τον *παροπλισμό* του, που, τις περισσότερες φορές συνοδεύεται από τη διάλυσή του.



**Σχήμα 3.2.1** Εφαρμογή Ανάλυση Κύκλου Ζωής στο πλοίο. Πηγή: <https://www.maritime-executive.com>

Ένα από τα σημαντικότερα μέρη της ανάλυσης, είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την ανάλυση του κόστους καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, γνωστή ως **Κόστος Κύκλου Ζωής (KKZ)**. Με τον τρόπο αυτό, για τον δυνητικό αγοραστή ενός πλοίου, η ανάλυση KKZ θα εξετάσει στην απόφαση αγοράς- όχι μόνο ως προς

την τιμή αγοράς- αλλά και τις δαπάνες που θα πρέπει να καλυφθούν στην πορεία του κύκλου ζωής. Από αυτή την άποψη, στο κόστος ζωής θα συμπεριληφθούν:

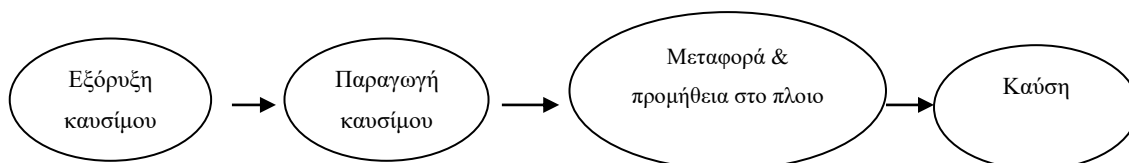
- ❖ το κόστος αγοράς που όμως καθορίζεται και από παράγοντες της εκάστοτε αγοράς.
- ❖ το λειτουργικό κόστος (καύσιμα, λιπαντικά, ενεργειακή απόδοση, ανταλλακτικά, συντήρηση κ.λπ.).
- ❖ το κόστος που σχετίζεται με τον παροπλισμό (αποσυναρμολόγηση και ανακύκλωση)

Οπωσδήποτε, τα δύο πρώτα μέρη αφορούν τον πλοιοκτήτη και το τρίτο και τελευταίο μέρος το υποψήφιο διαλυτήριο. Επομένως, η χρησιμότητα της AKZ και κατ' επέκταση του ΚΚΖ, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση διαφόρων παραγόντων που θα επηρεάσουν την ζωή του πλοίου. Με άλλα λόγια, μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της ωφέλιμης ζωής, στην ελάττωση του κόστους συντήρησης και μεγιστοποίηση του κέρδους στη φάση της διάλυσης. Ταυτόχρονα, θα έχει ελαχιστοποιήσει τις εκπομπές ρύπων και θα έχει συμβάλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος <sup>[31]</sup>.

### 3.2.2 Εφαρμογή της AKZ στα ναυτιλιακά καύσιμα

Με την χρήση της μεθοδολογίας AKZ αποκτάται η δυνατότητα προσέγγισης διαφόρων παραμέτρων οικονομικής αλλά κυρίως περιβαλλοντικής φύσεως που αφορά τα ναυτιλιακά καύσιμα. Για παράδειγμα, μια τυπική διάκριση περιβαλλοντικής φύσεως, είναι η εκτίμηση των έμμεσων και άμεσων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gases-GHG) καθώς και της απαίτησης σε πρωτογενή ενέργεια. Η ανάλυση που θα επικεντρώνεται στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των καυσίμων θα πρέπει να περιλαμβάνει τη διαδικασία AKZ «cradle-to-grave» όπου με τον όρο «cradle» εννοείται η εξόρυξη του καυσίμου. Έπειτα, ακολουθούν επιμέρους στάδια μετά την εξόρυξη, όπως η παραγωγή, η χρήση, η μεταφορά και η τελική κατάληξη του προϊόντος (καυσίμου), όπου περιγράφεται συνοπτικά με τον όρο «grave», το οποίο αφορά την καύση επί πλοίου. Σε κάθε στάδιο (Σχ. 3.2.2) θα πρέπει να υπολογίζονται οι εκπομπές ρύπων.

Όσον αφορά την AKZ που σχετίζεται με τα καύσιμα, θα πρέπει να περιλαμβάνει στο σχετικό κεφάλαιο «Προσδιορισμός σκοπού και στόχου και απογραφή δεδομένων» (ISO 14041) τουλάχιστον τα εξής στάδια:



**Σχήμα 3.2.2** Στάδια AKZ για αποτίμηση των επιπτώσεων των καυσίμων στο περιβάλλον.



Σε κάθε ΑΚΖ που αφορά τα καύσιμα, μπορούν να εξαχθούν διάφορες πληροφορίες οδηγώντας σε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Οι κύριες κατηγορίες, για τις πληροφορίες που μπορούμε να συλλέξουμε, περιλαμβάνουν:

- ❖ Συνολική απαίτηση σε πρωτογενή ενέργεια (συνήθης μονάδα: MJ, λαμβάνοντας υπ' όψη την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου).
- ❖ Επίδραση στο φαινόμενο υπερθέρμανσης του πλανήτη- IPC global warming potential (επηρεάζεται απ' την έκλυση μεθανίου, CO<sub>2</sub>, καθώς και εκπομπές SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>)
- ❖ Φαινόμενο Οξίνισης (επηρεάζεται από τις εκπομπές NO<sub>x</sub> και Πτητικές Οργανικές Ενώσεις).
- ❖ Φαινόμενο ευτροφισμού (επηρεάζεται από τις εκπομπές SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>).
- ❖ Επίδραση στην ανθρώπινη υγεία (επηρεάζεται από εκπομπές αιθάλης, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Πτητικές Οργανικές Ενώσεις)
- ❖ Φαινόμενο Φωτο-οξειδωσης <sup>[30]</sup>.

### 3.3 Υπολογισμός ΑΚΖ με χρήση λογισμικού (software)

Στις μέρες μας, υπάρχει διαθεσιμότητα από αρκετά ικανοποιητικό αριθμό λογισμικών που σχετίζονται με την ΑΚΖ. Η μεγάλη ποικιλία των λογισμικών στην αγορά καθιστά αναγκαίο να εντοπίσουμε και να διαχωρίσουμε τις γενικές μας απαιτήσεις, να καθορίσουμε την ποιότητα του λογισμικού και με γνώμονα αυτά, να γίνει η επιλογή του καταλληλότερου λογισμικού.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας, συχνά ανασταλτικός, για την επιλογή ενός λογισμικού ΑΚΖ είναι το κόστος αγοράς. Η διακύμανση των τιμών στην αγορά έχει αρκετά μεγάλο εύρος. Διάφορα λογισμικά προσφέρουν από ένα ευρύ φάσμα επιλογών και χαρακτηριστικών, έως εξειδίκευση σε συγκεκριμένους τομείς (π.χ. απόβλητα, πρώτες ύλες) ή εφαρμογές της ΑΚΖ (π.χ. υπηρεσίες, προϊόντα). Ωστόσο, ανεξάρτητα από τις όποιες διαφορές ανάμεσα στα λογισμικά αυτά, κάποιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά τους είναι βασικά και απαραίτητα και συνήθως απαιτούνται από τον χρήστη για κάθε λογισμικό <sup>[32]</sup>.

#### 3.3.1 Το λογισμικό SIMAPRO (έκδοση 7.2)

Το Πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Εργασία είναι το **SimaPro**, συγκεκριμένα η έκδοση **SimaPro 7.2**. Το SimaPro θεωρείται ένα κορυφαίο «εργαλείο» για την μελέτη της Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής. Παρέχεται η δυνατότητα με σύγχρονες βάσεις δεδομένων να μελετήσουμε όχι μόνο αναρίθμητα προϊόντα αλλά, επίσης, όλα τα επιμέρους στάδια από την παραγωγή έως την τελική τους χρήση. Σε περισσότερες από 80 χώρες παγκοσμίως, στους τομείς της Βιομηχανίας και της Επιστημονικής Έρευνας, αποτελεί

αναπόσπαστο κομμάτι στην διαδικασία των μετρήσεων για την βιώσιμη ανάπτυξη των προϊόντων καθώς και για την βιωσιμότητα των στόχων της εκάστοτε επιστημονικής έρευνας.

Το SimaPro παρέχει την δυνατότητα, με «φιλικό» - στο χρήστη – τρόπο, συγκέντρωσης, ανάλυσης και επισκόπησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων και των διαδικασιών ενός Κύκλου Ζωής. Με αυτόν τον τρόπο είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε με ακρίβεια όλες τις πτυχές της «αλυσίδας» από την εξαγωγή των πρώτων υλών έως την κατασκευή, διάθεση και χρήση του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης παρόμοιων προϊόντων, στην προκειμένη περίπτωση προϊόντα πετρελαίου.

Το SimaPro παρέχει αρκετές βάσεις δεδομένων όπως οι US LCI, ELCD και LCA food. Επίσης, παρέχονται πολλές μέθοδοι αξιολόγησης επιπτώσεων, όπως IMPACT 2002+, EPS 2000, Ecp-indicator 99, CML 2 baseline 2000 κ.ά.. **Στην Εργασία μας χρησιμοποιήσαμε την EPD (2008).**

Λόγω της εκτεταμένης χρήσης του παγκοσμίως, το SimaPro ελέγχεται συνεχώς διεξοδικά με αποτέλεσμα οι αναφορές του να θεωρούνται εξαιρετικά αξιόπιστες. Έχει ελάχιστες λειτουργικές απαιτήσεις με μοναδικά του μειονεκτήματα να θεωρούνται το αρκετά υψηλό τους κόστος και η εφαρμογή του, προς το παρόν, μόνο σε περιβάλλον Windows <sup>[33]</sup>.

## 4

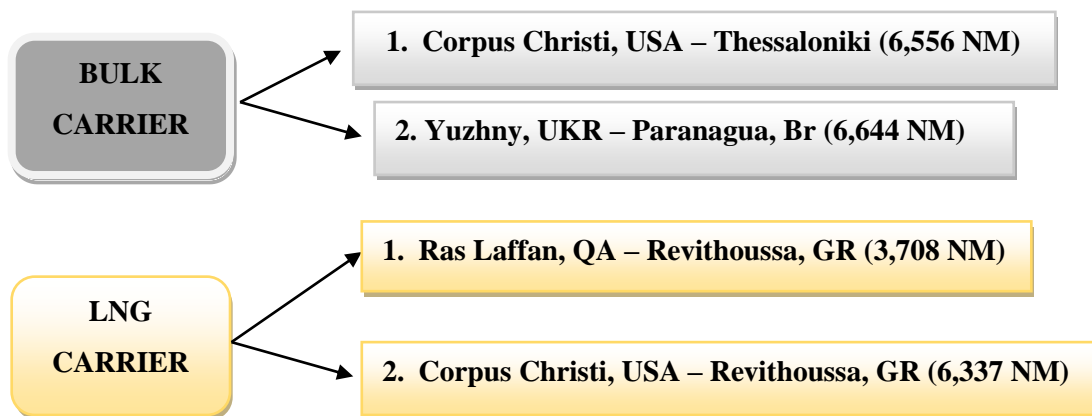
# *Περιγραφή των τεσσάρων (4) case studies, οριακές συνθήκες & πλοία αναφοράς*

Η παρούσα εργασία θα αναλύσει μέσω μελέτης AKZ τέσσερα (4) case studies δρομολογίων, δύο (2) διαφορετικά για καθένα από τα παρακάτω πλοία:

- **Bulk carrier (Φορτηγό πλοίο)** 38,000 DWT
- **LNG Carrier (Μεταφοράς Υγροποιημένου αερίου)** χωρητικότητας 160,000 m<sup>3</sup>

Τα case studies κατηγοριοποιήθηκαν ανά πλοίο (όχι ανά τύπο καύσιμου), αφορούν προσομοίωση πραγματικών δρομολογίων, με εναλλαγές σε καύσιμα για χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο όπου απαιτείται λόγω κανονισμών, σε προσομοίωση διανυθεισών αποστάσεων που θα ακολουθούσαν τα πλοία στην πραγματικότητα εάν εκτελούσαν αυτά τα δρομολόγια.

Τα λιμάνια των ταξιδιών και κατ' επέκταση οι πορείες των πλοίων (π.χ. εντός ή εκτός περιοχών ECA) επιλέχθηκαν αρχικά, για να μπορεί να συνδυαστεί η εναλλαγή καυσίμων ανάλογα με τους ισχύοντες κανονισμούς, ώστε να φανούν οι διαφορές στις εκπομπές ρύπων στην αντίστοιχη λειτουργική κατάσταση των πλοίων. Επιπλέον, για να μπορούν τα αποτελέσματα να συγκριθούν με πραγματικά ταξίδια που εκτελούν αντίστοιχα πλοία λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τις παραδοχές και τους περιορισμούς της παράγραφου [4.1](#).









Σχήμα 4.1 Τα 4 επιμέρους ταξίδια που αναλύθηκαν στην εργασία (2 για κάθε πλοίο).

#### 4.1 Περιορισμοί/ Οριακές συνθήκες

	Περιγραφή Περιορισμών/ Παραδοχών	Εφαρμογή στα υπό μελέτη πλοία
1.	Δεν υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα δέσμευσης ρύπων (π.χ. scrubbers) επομένως, δεν είναι δυνατή η χρησιμοποίηση καυσίμου με υψηλότερη περιεκτικότητα θείου απ' όση ορίζουν οι ισχύοντες κανονισμοί της MARPOL.	LNG Carrier / Bulk Carrier
2.	Τα αναφερόμενα καύσιμα στους υπολογισμούς συμμορφώνονται πλήρως με τους εν ισχύ κανονισμούς της MARPOL (βλ. Κεφ. 2) αλλά και τους τοπικούς κανονισμούς (π.χ. χρήση MGO με 0,01% σε θείο σε λιμάνια της Ευρωπαϊκής Ένωσης).	LNG Carrier / Bulk Carrier
3.	Κατά τη διάρκεια των ταξιδιών, σε όλες τις συνθήκες (ελιγμών, ταξιδιού, κλπ.) δεν λήφθηκαν υπ' όψη οι καιρικές συνθήκες και η ρύπανση της γάστρας.	LNG Carrier / Bulk Carrier
4.	Στο Bulk carrier πλοίο, δεδομένου ότι το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι το VLSFO (RME-180 κατά ISO με ΘΓ: 39000 KJ/Kg) και όχι το Marine Diesel (DMX κατά ISO με ΘΓ: 42700 KJ/Kg) σύμφωνα με το οποίο υπολογίστηκε η κατανάλωση στα shop trials, η πραγματική κατανάλωση διορθώνεται με τον λόγο των θερμογόνων δυνάμεων των προαναφερθέντων καυσίμων x ειδική κατανάλωση σχεδιασμού των μηχανημάτων:  <b>Για κύρια μηχανή:</b>  $BSFC_{VLSFO\ M/E} = (42700KJ/Kg / 39000KJ/Kg) BSFC_{des} (170\ g/kWh) = 186.13\ g/kWh.$	Bulk Carrier

	<p><b><u>Για ηλεκτρογεννήτριες:</u></b></p> <p><math>BSFC_{VLSFO\ D/G} = (42700KJ/Kg / 39000KJ/Kg) BSFC_{des} = 213.5\ g/kWh.</math></p> <p><b><u>Τελικά:</u></b></p> <p>Από τις παραπάνω ειδικές καταναλώσεις, χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο <b>Παροχής Καυσίμου</b> για τις τελικές καταναλώσεις σε VLSFO =&gt;</p> <p><b><u>Για κύρια μηχανή:</u></b></p> <p><math>m'_{M/E} = BSFC_{VLSFO\ M/E} * MCR\ (kW)_{M/E}</math></p> <p><b><u>Για ηλεκτρογεννήτριες:</u></b></p> <p><math>m'_{D/G} = BSFC_{VLSFO\ D/G} * MCR\ (kW)_{D/G}</math></p>	
5.	Χάριν απλότητας, στο Bulk carrier, οι καταναλώσεις του boiler σε VLSFO και MGO εμφανίζονται ίδιες.	<b>Bulk Carrier</b>
6.	Για τον υπολογισμό της συνολικής απόστασης που καλύπτουν τα πλοία, χρησιμοποιήθηκε το software «NetPass» που χρησιμοποιείται από πολλές ναυτιλιακές εταιρίες για υπολογισμό ταξιδιών.	<b>LNG Carrier / Bulk Carrier</b>
7.	Λόγω έλλειψης βιβλιογραφίας, δεν λαμβάνονται υπόψη πραγματικά στοιχεία για τις Well-To-Tank καταναλώσεις παρα μόνο προσεγγιστικά μέσω του database του SIMAPRO.	<b>LNG Carrier / Bulk Carrier</b>
8.	Το Boil Off Gas <b>αμελήθηκε</b> καθώς θεωρήθηκε ότι το πλοίο έχει reliquification plant (δεν έχει στην πραγματικότητα).	<b>LNG Carrier</b>

**Πίνακας 4.1.1** Περιορισμού και οριακές συνθήκες που λήφθηκαν υπόψη στην εργασία.

Καύσιμο	Bulk Carrier 38,000 DWT	LNG Carrier 160,000 m <sup>3</sup>
Μαζούτ υψηλής περιεκτικότητας σε θείο (HFO >0,5% sulfur)	Δεν χρησιμοποιείται διότι δεν έχει εγκατασταθεί σύστημα δέσμευσης ρύπων (π.χ. scrubbers).	
Μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (VLSFO ≤ 0,5% sulfur)		
Ναυτιλιακό Ντήζελ με χαμηλό θείο (MGO)		
Υγροποιημένο Αέριο (LNG)		

**Πίνακας 4.1.2** Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν από τα δύο υπό μελέτη πλοία.

Το πρώτο κομμάτι της AKZ, θα περιλαμβάνει ανάλυση τύπου “Well-To-Tank” (Upstream emissions) και θα αφορά τις εκπομπές ρύπων κατά την εξόρυξη καυσίμου και την διανομή του (ως καύσιμο) μέχρι την αποθηκευτική δεξαμενή των πλοίων. Το δεύτερο κομμάτι, θα περιλαμβάνει ανάλυση τύπου “Tank-to Propeller” (downstream emissions) και θα επικεντρώνεται στις εκπομπές ρύπων κατά την τελική χρήση του καυσίμου από το πλοίο αναφοράς. Επιπλέον, σ’ αυτό το στάδιο, θα αναλυθούν και τα δρομολόγια των πλοίων, προσομοιάζοντας πραγματικές αποστάσεις και καταστάσεις πλεύσης όπως παραμονή στο λιμάνι, σε κατάσταση πλεύσης στο πέλαγος καθώς και σε κατάσταση ελιγμών/ pilotage.

## 4.2 Περιγραφή Bulk Carrier πλοίου 38k DWT

Το πρώτο πλοίο αναφοράς είναι **Bulk Carrier**, 38.000 DWT ναυπηγημένο στο Ιαπωνικό ναυπηγείο Imabari Shipyards το 2014. Εκτός από τον τύπο πλοίου και την αλυσίδα καύσιμου, το ενδιαφέρον για την ανάλυση “Tank-to-propeller”, πρέπει να εστιαστεί στα μηχανήματα που απελευθερώνουν καυσαέρια και ρύπους στην ατμόσφαιρα.

### 4.2.1 Κύρια Χαρακτηριστικά και καταναλώσεις BC 38k DWT

Τα μηχανήματα που μας ενδιαφέρουν, ως προς τις εκπομπές ρύπων, στο Bulk Carrier πλοίο είναι τα παρακάτω:

- ❖ Μία (1) δίχρονη, Κύρια Προωστήρια Μηχανή Diesel MAN B&W (Main Diesel Engine), σε ευθεία ζεύξη με την έλικα.
- ❖ Τρείς (3) Ηλεκτρογεννήτριες Yanmar ικανότητας 440 kW (Auxiliary Diesel Engines) που καλύπτουν τις ηλεκτροπαραγωγικές ανάγκες του πλοίου.

❖ Ένας (1) Βοηθητικός Λέβητας Miura (Auxiliary Boiler) που καλύπτει την ανάγκη για παραγωγή ατμού στο πλοίο και τροφοδοτείται από την ενέργεια καυσαερίων (εν πλώ) αλλά και καυσίμου (στο λιμάνι).

<b>Κόρια Χαρακτηριστικά πλοίου Bulk Carrier (Ship Particulars)</b>	
<b>Ship's name:</b>	MV "ΙΘΑΚΙ"
<b>LOA:</b>	179.97 m
<b>Breadth:</b>	29.80 m
<b>Depth:</b>	15.00 m
<b>GT:</b>	23,268
<b>DWT:</b>	38,060 MT
<b>Κόρια Μηχανή (Main Diesel Engine):</b>	<b>MAKITA-MITSUI B&amp;W 6S46ME- B 8.3 x 1 μονάδα</b> MCR : 6820 Kw @ 110 rpm BSFC <sub>des</sub> : 170 g/kWh (Engine's project guide para. 2.09/ page 1 of 2) BSFC <sub>VLSFO M/E</sub> : 186.13 g/kWh (δες παράγραφο 4.1/ No4, για καύσιμο VLSFO) Συμμόρφωση με IMO: Tier II BSFC <sub>VLSFO</sub> =
<b>Ηλεκτρο-γεννήτριες (Auxiliary Diesel Engines):</b>	<b>YANMAR 6EY18ALW x 3 μονάδες</b> MCR: 440 Kw @ 900 rpm BSFC <sub>des</sub> : 195,0 g/kWh (shop trial manual, για καύσιμο MGO) BSFC <sub>VLSFO D/G</sub> : 213.5 g/kWh (δες παράγραφο 4.1/ No4, για καύσιμο VLSFO) Συμμόρφωση με IMO: Tier II
<b>Βοηθητικός Λέβητας (Auxiliary Boiler):</b>	<b>MIURA GK-2028 x 1 μονάδα</b> Evaporation: 1000 kg/h (FW 60C @ 6 Kg/cm <sup>2</sup> pressure)
<b>Καύσιμο μηχανών:</b>	Πετρέλαιο VLSFO Πετρέλαιο MGO
<b>Ναυπηγείο:</b>	SHIMANAMI SHIPYARD CO., LTD, JAPAN.
<b>Έτος ναυπήγησης:</b>	2014

**Πίνακας 4.2.1** Τα χαρακτηριστικά του Bulk Carrier πλοίου και των μηχανημάτων του.



**Εικόνα 4.2.2** Το Bulk Carrier πλοίο ΙΤΗΑΚΙ κατά τη διάρκεια ελιγμών στα sea trials, τον Νοέμβριο του 2014. Πηγή: Lydia Mar Shipping (διαχειρίστρια εταιρία του πλοίου)

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος κατά την λειτουργία των μηχανημάτων είναι οι καταναλώσεις καυσίμου καθώς, για παράδειγμα στις χερσαίες μεταφορές, έχει αναλυθεί (βλ. Reducing Carbon Emissions from Transport Projects, 2010) ότι αυξημένες καταναλώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση των εκπεμπόμενων ρύπων, ειδικά αν χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα ορυκτά καύσιμα όπως τα παράγωγα του πετρελαίου.

Στα πλοία αναφοράς, οι καταναλώσεις εξάχθηκαν από τα εγχειρίδια των sea trials, shop trials.

Καταναλώσεις για το Bulk Carrier 38k DWT							
Καύσιμο	Ντίζελ (MGO- 0,1% sulphur)			Μαζούτ (VLSFO –0,5 % sulfur)			Σχόλια
	75%	85%	100%	75%	85%	100%	
Φορτίο Κ/Μ							Οι καταναλώσεις MGO στα αντίστοιχα φορτία είναι από το εγχειρίδιο των Sea trials. BSFC <sub>des</sub> = 170,0 g/kWh
Καταναλώσεις Κύριας Μηχανής (τόνους/ ημέρα):	20.6	23.0	27.2	22.02 <sup>1</sup>	24.92 <sup>1</sup>	30.46 <sup>1</sup>	
Απόδοση Κύριας Μηχανής:	4930 kW @ 105 rpm	5580 kW @ 109 rpm	6820 kW @ 110 rpm	4930 kW @ 105 rpm	5580 kW @ 109 rpm	6820 kW @ 110 rpm	
Συμμόρφωση IMO:	Tier II			Tier II			
Φορτίο Η/Γεν.:	50%	75%	100%	50%	75%	100%	Οι καταναλώσεις και το φορτίο είναι από το εγχειρίδιο των Shop trials. BSFC <sub>des</sub> = 195,0 g/kWh
Καταναλώσεις Ηλεκτρογεννητριών Νο1-3: (τόνους/ ημέρα):	1.24	1.72	2.19	1.13 <sup>2</sup>	1.69 <sup>2</sup>	2.25 <sup>2</sup>	
Απόδοση Ηλεκτρογεννητριών :	220 kW @ 900 rpm	330 kW @ 900 rpm	440 kW @ 900 rpm	220 kW @ 900 rpm	330 kW @ 900 rpm	440 kW @ 900 rpm	
Συμμόρφωση IMO:	Tier II			Tier II			
Καταναλώσεις Βοηθ. Λέβητα	1.836			1.836			



(τον/ ημέρα):			
Συμμόρφωση IMO:	Tier II		N/A
Σημειώσεις:	<p>1. <u>Κ/Μ - Διόρθωση για VLSFO</u>: <math>BSFC_{VLSFO\ M/E} = (42700\text{ KJ/ Kg} / 39000\text{ KJ/ Kg}) * BSFC_{des} = 186.13\text{ g/ kWh} \Rightarrow</math>  <u>Παροχή καυσίμου = m<sup>3</sup></u> = <math>BSFC_{HFO} * MCR = (\text{kg/ sec}) \Rightarrow (\text{tn/ day})</math></p> <p>2. <u>Η/Γ - Διόρθωση για VLSFO</u>: <math>BSFC_{VLSFO\ D/G} = (42700\text{ KJ/Kg} / 39000\text{ KJ/Kg}) * BSFC_{des} = 213.5\text{ g/ kWh} \Rightarrow</math>  <u>Παροχή καυσίμου = m<sup>3</sup></u> = <math>BSFC_{HFO} * MCR = (\text{kg/ sec}) \Rightarrow (\text{tn/ day})</math></p>		

**Πίνακας 4.2.3** Τα φορτία λειτουργίας ανά μηχανήμα και οι καταναλώσεις για το Bulk Carrier.

#### 4.2.2 Χρησιμοποιούμενα καύσιμα - Bulk Carrier 38k DWT

Στα παραδείγματα που αναλύονται στην παρούσα εργασία αλλά και στην πραγματικότητα, το Bulk Carrier χρησιμοποιεί δύο είδη καυσίμων: Το κοινώς λεγόμενο στη ναυτιλία VLSFO, το οποίο είναι βαρύ κλάσμα πετρελαίου με κινηματικό ιξώδες συνήθως κάτω από τα 200 cSt και με περιεκτικότητα θείου λιγότερη από 0,5% κ/β, όπως ορίζει η MARPOL.

Το άλλο καύσιμο είναι το Marine Gas Oil με περιεκτικότητα σε θείο όχι παραπάνω από 0,1%.

<b>Χαρακτηριστικά MGO καυσίμου</b>	
<b>Σύνοψη αποτελεσμάτων ανάλυσης LNG καυσίμου</b>	
Πρότυπη θερμοκρασία	15.4 °C
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη	40.34 MJ/ Kg
Σχετική Πυκνότητα (πραγματική)	0.9844 Kg/ m <sup>3</sup>

**Πίνακας 4.2.4** Χαρακτηριστικά MGO καυσίμου που χρησιμοποιεί το LNG Carrier. Πηγή:

Εγχειρίδιο M-109 “Machinery Results of Sea trials του Bulk Carrier ΙΤΗΑΚΙ

<b>Χαρακτηριστικά VLSFO καυσίμου</b>	
<b>Σύνοψη αποτελεσμάτων ανάλυσης LNG καυσίμου</b>	
Πρότυπη θερμοκρασία	15. °C
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη	39.00 MJ/ Kg
Σχετική Πυκνότητα (πραγματική)	0.9150 Kg/ L

**Πίνακας 4.2.5** Χαρακτηριστικά VLSFO καυσίμου που υποτέθηκαν για τους υπολογισμούς.

### 4.3 Περιγραφή LNG carrier 160k cbm

Το δεύτερο πλοίο αναφοράς είναι πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου αερίου LNG (LNG carrier), χωρητικότητας 160.000 m<sup>3</sup>, ναυπηγημένο σε ναυπηγείο της Νότιας Κορέας. Το πλοίο φέρει Προωστήρια εγκατάσταση διπλού καυσίμου (dual fuel) που αναμένεται να είναι το μέλλον στην πρόωση των ποντοπόρων πλοίων.

#### 4.3.1 Κύρια Χαρακτηριστικά και καταναλώσεις LNG 160k cbm

Όπως αναλύσαμε και στο Bulk Carrier πλοίο, θα εστιάσουμε στα μηχανήματα από τα οποία εκλύονται ρύποι μέσω των καυσαερίων τους, Το LNG carrier πλοίο φέρει τα ακόλουθα μηχανήματα:

- ❖ Τέσσερις (4) τετράχρονες, Κύριες/ Βοηθητικές Μηχανές Diesel (**Propulsion/ Power Engines**) οι οποίες καλύπτουν όχι μόνο τις ηλεκτροπαραγωγικές, αλλά τις προωστήριες ανάγκες του πλοίου δίνοντας αντίστοιχα κίνηση σε 2 μοτέρ πρόωσης (Propulsion motor) τα οποία, μέσω μειωτήρα στροφών (gear box), στρέφουν τον τελικό άξονα (tailshaft).
- ❖ Τρείς (3) Ηλεκτρογεννήτριες (Auxiliary Diesel Engines)
- ❖ Δύο (2) Βοηθητικοί Λέβητες (Auxiliary Boiler) για την παραγωγή ατμού.

<b>Κύρια Χαρακτηριστικά LNG Carrier (Ship Particulars)</b>	
<b>Ship's name:</b>	MT "160k cbm TFDE standard design"
<b>LOA:</b>	280.0 m
<b>Breadth:</b>	43.00 m
<b>Depth</b>	20.00 m
<b>GT:</b>	102,000
<b>Capacity:</b>	160,000 m <sup>3</sup>
<b>DWT:</b>	81,800 MT
<b>Προωστήρια Εγκατάσταση (Propulsion plant)</b>	Electric Motor (24,980 kW @ 85.1 RPM)
<b>Κύριες/ Βοηθητικές Μηχανές (Power Engines):</b>	<b>Wartsila W6L50DF x 1 set</b> <b>MCR:</b> 5850 Kw @ 514 rpm <b>Συμμόρφωση IMO:</b> Tier II (Diesel Mode) – Tier III (Gas Mode)

	<b>W12V50DF x 3 sets</b> <b>MCR: 11700 Kw @ 514 rpm</b> <b>Συμμόρφωση. IMO: Tier II (Diesel Mode) – Tier III (Gas Mode)</b>
<b>Βοηθητικοί Λέβητες (Auxiliary Boiler):</b>	<b>Aalborg OS – 1C x 2 sets</b> <b>Evaporation: 5000 kg/h</b> <b>Κατανάλωση: 225 Kg/ h (MGO) – 5.44 MT/ ημέρα</b>
<b>Οικονομητήρες καυσαερίων (Exhaust Gas Economizers):</b>	<b>Aalborg XS-7V x 4 sets</b> <b>Evaporation: 1000~1500 kg/ h</b>
<b>Καύσιμο μηχανών (Used Bunker):</b>	VLSFO- MGO – LNG
<b>Ναυπηγείο:</b>	Samsung Heavy Industries
<b>Έτος ναυπήγησης:</b>	2016

**Πίνακας 4.3.1** Τα χαρακτηριστικά του LNG Carrier πλοίου και των μηχανημάτων του.



**Εικόνα 4.3.2** Το LNG Carrier πλοίο, χωρητικότητας 160k m<sup>3</sup>, κατά τη διάρκεια πλεύσης. Πηγή: Marinetrffic.com

Καταναλώσεις μηχανημάτων LNG carrier 160k cbm TFDE standard design							
Καύσιμο	Ντίζελ (MGO)			Αέριο (LNG)			Σχόλια
	50%	75%	100%	50%	75%	100%	
<b>Φορτίο Κ/Μ</b>							Οι καταναλώσεις MGO και LNG στα αντίστοιχα φορτία είναι από το εγχειρίδιο των shop trials.
<b>Καταναλώσεις Κύριων/ Βοηθ. Μηχανών Wartsila W12V50DF No1, No2 &amp; No3</b>	27.30 t/ day	39.66 t/ day	53.12 t/ day	31,39 m <sup>3</sup> / day	41,90 m <sup>3</sup> / day	57,60 m <sup>3</sup> / day	
<b>Απόδοση Μηχανών:</b>	kW 5708 @514 rpm	kW8620 @514 rpm	kW 11526 @514	kW 5708 @514	kW 8620 @514	kW 11526 @514	

			rpm	rpm	rpm	rpm	
<b>Αποδοτικότητα Μηχανών:</b>	97.57%	98.23%	98.51%	97.57%	98.23%	98.51%	
<b>Συμμόρφωση IMO:</b>	Tier II			Tier III			
<b>Κατανάλωση Κύριας/Βοηθ. Μηχανής Wartsila W6L50DF No4</b>	13,87 t/ day	20,12 t/ day	26,99 t/ day	15,840 m <sup>3</sup> / day	21,168 m <sup>3</sup> / day	28,944 m <sup>3</sup> / day	Οι καταναλώσεις MGO και LNG στα αντίστοιχα φορτία είναι από το εγχειρίδιο των shop-trials.
<b>Απόδοση Μηχανής:</b>	kW 2925 @514 rpm	kW 4388 @514 rpm	kW 5850 @514 rpm	kW 2925 @514 rpm	kW 4388 @514 rpm	kW 5850 @514 rpm	
<b>Αποδοτικότητα Μηχανής:</b>	95.42%	96.87%	97.57%	95.42%	96.87%	97.57%	
<b>Συμμόρφωση IMO:</b>	Tier II			Tier III			
<b>Κατανάλωση Οικονομητήρων No1-4:</b>	-			-			
<b>Καταναλώσεις Βοηθ. Λεβητών No1 – No2 :</b>	5,44 τόνους / ημέρα/ λέβητα			-			Η κατανάλωση MGO είναι από το εγχειρίδιο του shop trial. Για MGO, αναφέρει ως min Burner capacity = 110 kg/h και max Burner capacity= 344 kg/h. Πάρθηκε ο μ.ο, άρα 227 kg/h.

**Πίνακας 4.3.3** καταναλώσεις μηχανημάτων του προς μελέτη LNG Carrier πλοίου

#### 4.3.2 Χρησιμοποιούμενα καύσιμα - LNG Carrier 160k DWT

Το LNG Carrier χρησιμοποιεί δύο είδη καυσίμων: Το υγροποιημένο αέριο (LNG) καθώς και Marine Gas Oil για τους βοηθητικούς λέβητες.

Αμφότερα τα παραπάνω καύσιμα έχουν περιεκτικότητα σε θείο, όχι παραπάνω από 0,1% κ.β.

<b>Χαρακτηριστικά MGO καυσίμου</b>	
Πρότυπη θερμοκρασία	15.4 °C
<b>Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη</b>	<b>40.34 MJ/ Kg</b>
Σχετική Πυκνότητα (πραγματική)	0.9844 Kg/ m <sup>3</sup>

**Πίνακας 4.3.4** Χαρακτηριστικά MGO καυσίμου που χρησιμοποιεί το LNG Carrier. Πηγή:

Εγχειρίδιο M 109 “Machinery Results of Sea trials του Bulk Carrier

<b>Χαρακτηριστικά LNG καυσίμου</b>	
Πρότυπη πίεση	101.325 kPa (1 atm)
Πρότυπη θερμοκρασία	15.0 °C
Ανωτέρα Θερμογόνος Δύναμη	46.42 MJ/ Kg
<b>Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη</b>	<b>41.92 MJ/ Kg</b>
Σχετική Πυκνότητα (πραγματική)	0.6734 Kg/ m <sup>3</sup>
Δείκτης Wobbe (WI)	46.7 MJ/ Nm <sup>3</sup>

**Πίνακας 4.3.5** Χαρακτηριστικά LNG καυσίμου που χρησιμοποιεί το LNG Carrier. Πηγή: Εγχειρίδιο Sea trials του LNG carrier 160k m<sup>3</sup>

#### 4.4 Case Study No1 - Bulk Carrier - Δρομολόγιο: Corpus Christi – Θεσσαλονίκη

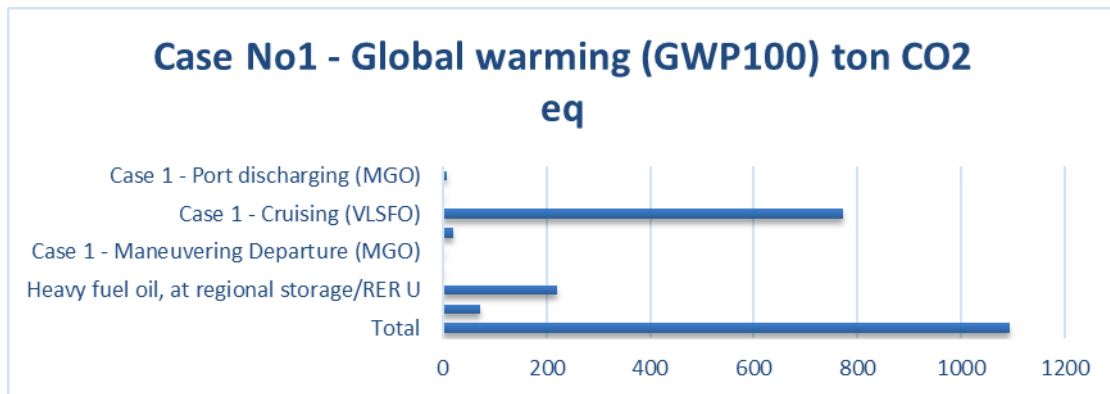
Για το πρώτο case study που αναφέρεται στο Bulk Carrier, υποτέθηκε φόρτωση σιτηρών χρησιμοποιώντας φόρτο-εκφορτωτικά μέσα του λιμανιού, από το **Corpus Christi** του Texas (ΗΠΑ) με λιμάνι εκφόρτωσης την **Θεσσαλονίκη**. Στο λιμάνι εκφόρτωσης, υποθέσαμε ότι θα χρησιμοποιηθούν οι γερανοί του πλοίου με αρπάγες (cargo grabs) γεγονός που θα συμβάλλει στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών που θα εργαστούν σε υψηλότερα φορτία για να υποστηρίξουν την χρήση των γερανών του πλοίου κατά την εκφόρτωση.

Η συνολική διανυθείσα απόσταση για αυτό το ταξίδι είναι 6,556 ναυτικά μίλια, εκ των οποίων τα 430 διανύονται εντός της Αμερικανικής Emission Control Area (ECA) που σημαίνει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας θείου (0,1 %) με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς. Επίσης, η παραμονή στο λιμάνι της Θεσσαλονίκης απαιτεί το ίδιο καύσιμο (0,1 % θείο) εξαιτίας της EU Directive (EU) 2016/802. Στο υπόλοιπο ταξίδι υποτέθηκε καύσιμο με περιεκτικότητα σε θείο 0,5%, όπως ορίζεται στο κεφ. 6 της MARPOL και όπως θα χρησιμοποιούσε οποιοδήποτε αντίστοιχο πλοίο.

##### Case Study No1 - Ώρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile)

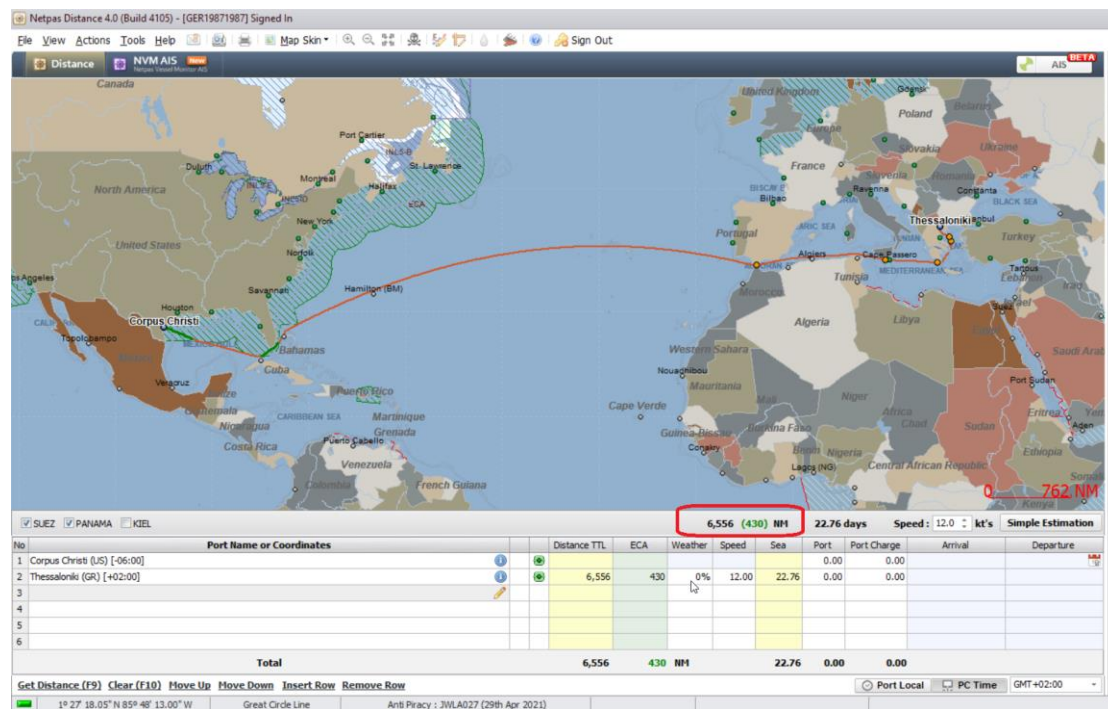
Case Study No1	Παραμονή σε λιμάνι (Port/ Anchorage Stay)	Ελιγμοί (Maneuvering)	Πλεύσιμη κατάσταση (Cruising)	Συνολικές Ώρες (Total hours)	Διανυθείσα απόσταση σε NM (distance covered in NM)
Ώρες Παραμονής	240	1,75	527,8	769,55	6556
Κατανάλωση VLSFO (MT)	0	0,55	488,46	-	-
Κατανάλωση MGO (MT)	62,73	0,70	80,23	-	-

**Πίνακας 4.4.1** Case Study No1: Ώρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile).



Σχήμα 4.4.2 Case Study No1: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κατάσταση πλεύσης.

Οι συνολικοί υπολογισμοί και τα σενάρια λειτουργίας των μηχανημάτων του πλοίου προσαρτώνται στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι](#).



Εικόνα 4.4.3 Το δρομολόγιο του πρώτου case study: Corpus Christi - Θεσσαλονίκη. Πηγή: Netpass.

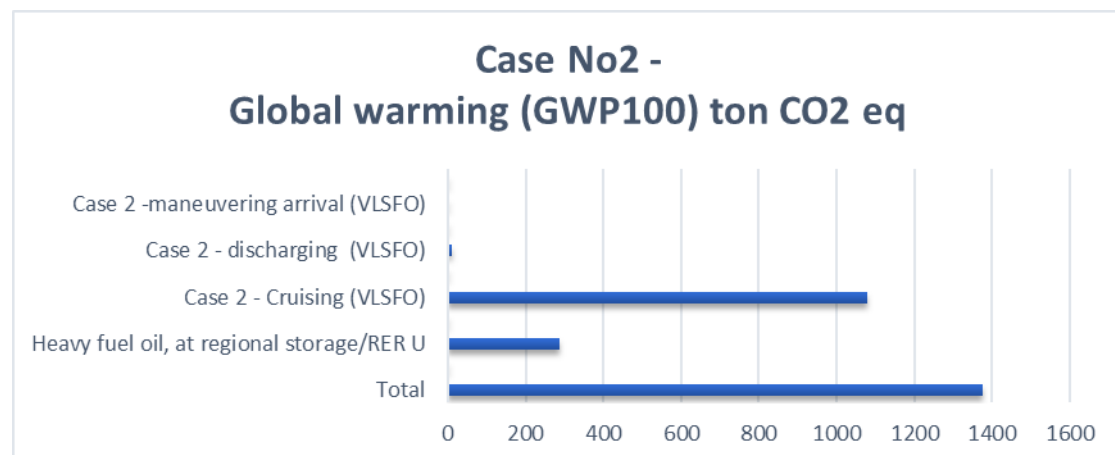
## 4.5 Case Study No2 - Bulk Carrier – Δρομολόγιο: Yuzhny – Paranagua

Στο δεύτερο case study του Bulk Carrier, υποτέθηκε φόρτωση σιτηρών χρησιμοποιώντας φόρτο-εκφορτωτικά μέσα του λιμανιού από το **Yuzhny** της Ουκρανίας με προορισμό την **Paranagua** της Βραζιλίας. Στην Paranagua, υποτέθηκε ότι θα χρησιμοποιηθούν και οι 4 γερανοί του πλοίου γεγονός που θα επιφέρει αυξημένη κατανάλωση καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών διότι θα αναγκαστούν να εργαστούν σε υψηλότερα φορτία για να τροφοδοτήσουν με ηλεκτρική ενέργεια τους γεραμούς του πλοίου.

### Case Study No2 - Ώρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile)

Case Study No2	Παραμονή σε λιμάνι (Port/ Anchorage Stay)	Ελιγμοί (Maneuvering)	Πλεύσιμη κατάσταση (Cruising)	Συνολικές Ώρες (Total hours)	Διανυθείσα απόσταση σε NM (distance covered in NM)
Ώρες Παραμονής	258	2	533.88	793,88	6644
Κατανάλωση VLSFO (MT)	61.15	1.10	578.44	-	-
Κατανάλωση MGO (MT)	2.25	0	0	-	-

**Πίνακας 4.5.1** Case Study No2: Ώρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile).

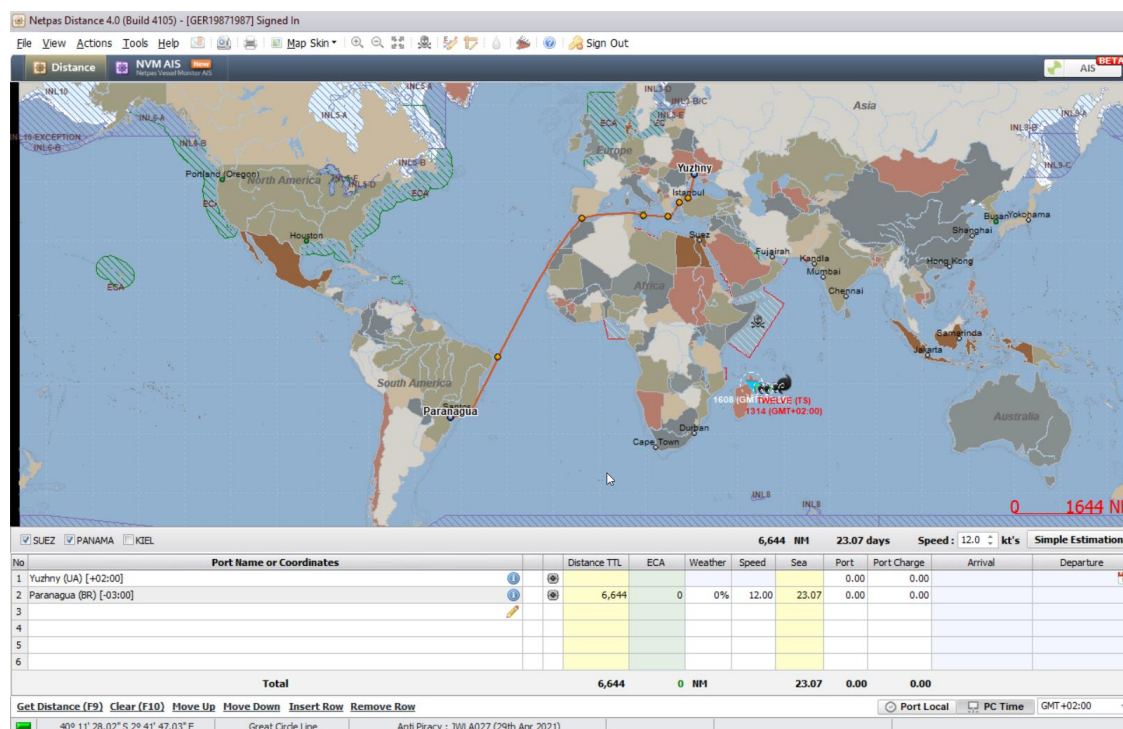


**Πίνακας 4.5.2** Case Study No2: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κατάσταση πλεύσης.



Η συνολική διανυθείσα απόσταση είναι 6,644 ναυτικά μίλια χωρίς να παρεμβάλλεται ταξίδι εντός Emission Control Area (ECA) συνεπώς, το χρησιμοποιούμενο καύσιμο σε όλη τη διάρκεια του ταξιδιού καθώς και είναι περιεκτικότητας 0,5% σε θείο, σύμφωνα με την αναθεωρημένη MARPOL/ Κεφ.6. Η μόνη εναλλαγή καυσίμου σε 0,1% πραγματοποιείται κατά την μικρή παραμονή (18 ώρες) του πλοίου στο βόρειο αγκυροβόλιο του Βοσπόρου, εν αναμονή διάσχισης του καναλιού, όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα.

Οι συνολικοί υπολογισμοί και τα σενάρια λειτουργίας των μηχανημάτων του πλοίου προσαρτώνται στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι](#).



**Εικόνα 4.5.3** Το δρομολόγιο του 2<sup>ου</sup> case study για το Bulk Carrier: Yuzhny - Paranagua. Πηγή: Netpass.

## 4.6 Case Study No3 - LNG carrier – Δρομολόγιο: Ras Laffan – Ρεβουθούσα

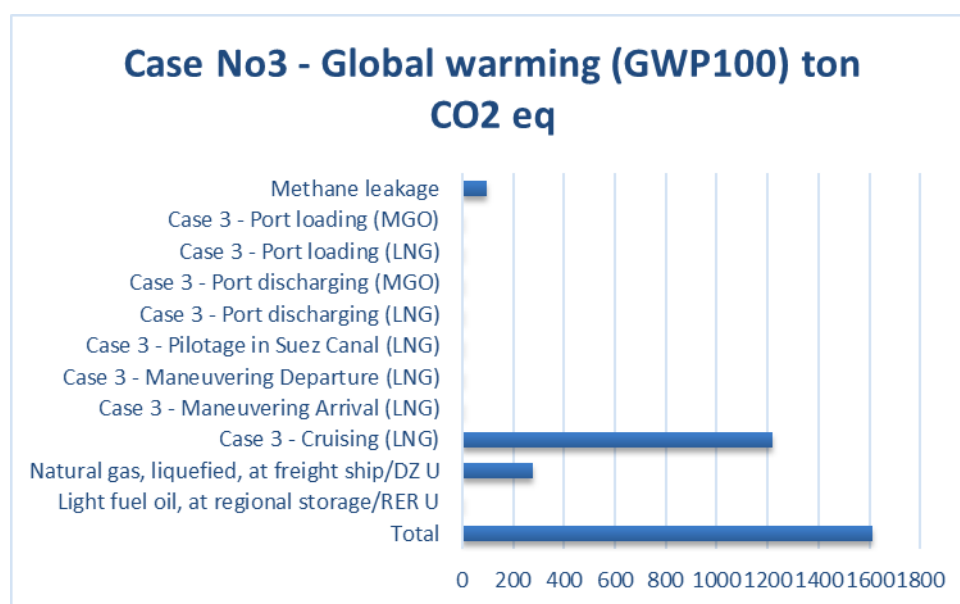
Το τρίτο κατά σειρά case study αφορά το LNG carrier πλοίο. Υποτέθηκε φόρτωση στον τερματικό σταθμό LNG στο **Λάς Ραφάν** του Κατάρ με προορισμό τον Ελληνικό Τερματικό Σταθμό στη **Ρεβουθούσα**.

Η συνολική διανυθείσα απόσταση είναι 3,708 ναυτικά μίλια. Δεν πραγματοποιείται κάποια εναλλαγή σε καύσιμα καθώς το χρησιμοποιούμενο LNG είναι το πλέον καθαρό καύσιμο σε ρύπους και συμμορφώνεται με όλους τους κανονισμούς παγκοσμίως.

### Case Study No3 – Ωρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile)

Case Study No3	Παραμονή σε λιμάνι (Port/ Anchorage Stay)	Ελιγμοί (Maneuvering)	Πλεύσιμη κατάσταση (Cruising)	Συνολικές Ωρες (Total hours)	Διανυθείσα απόσταση σε NM (distance covered in NM)
Ωρες Παραμονής	52	5	205.87	262.87	3708
Κατανάλωση MGO (MT)	11,32	0	0	-	-
Κατανάλωση LNG (MT)	77,56	7,13	320,83		

**Πίνακας 4.6.1** Case Study No3: Ωρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile).

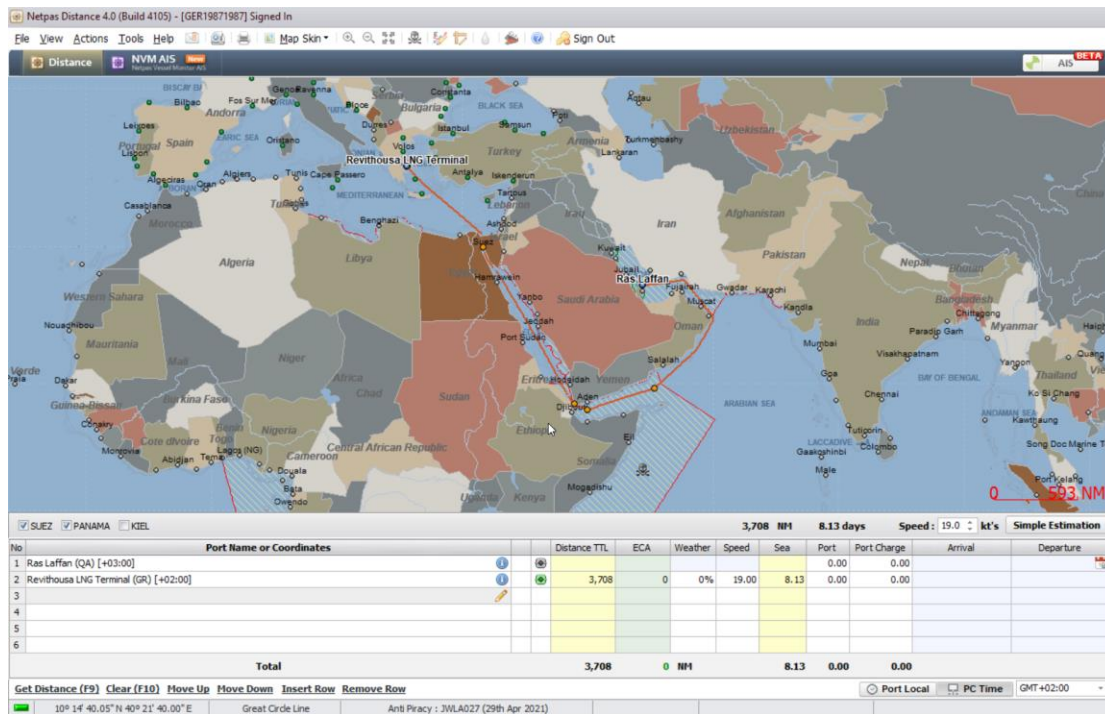


**Πίνακας 4.6.2** Case Study No3: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κατάσταση πλεύσης.

Τέλος, το χρησιμοποιούμενο από τους δύο βοηθητικούς λέβητες ναυτιλιακό ντίζελ (MGO) είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (0,1%).

Σημειωτέο είναι δε ότι τα σενάρια λειτουργίας των μηχανημάτων για το LNG carrier είναι ευγενική παραχώρηση του συναδέλφου, Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ, Χρήστου Μάγκου, ο οποίος εργάζεται στο τεχνικό τμήμα μεγάλης εταιρίας διαχείρισης LNG Carrier.

Οι συνολικοί υπολογισμοί και τα σενάρια λειτουργίας των μηχανημάτων του πλοίου προσαρτώνται στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι](#).



**Εικόνα 4.6.3** Το δρομολόγιο του 3<sup>ου</sup> case study αφορά το LNG Carrier: Ras Laffan - Ρεβυθούσα.

Πηγή: Netpass.

## 4.7 Case Study No4 - LNG carrier – Δρομολόγιο: Corpus Christi – Ρεβυθούσα

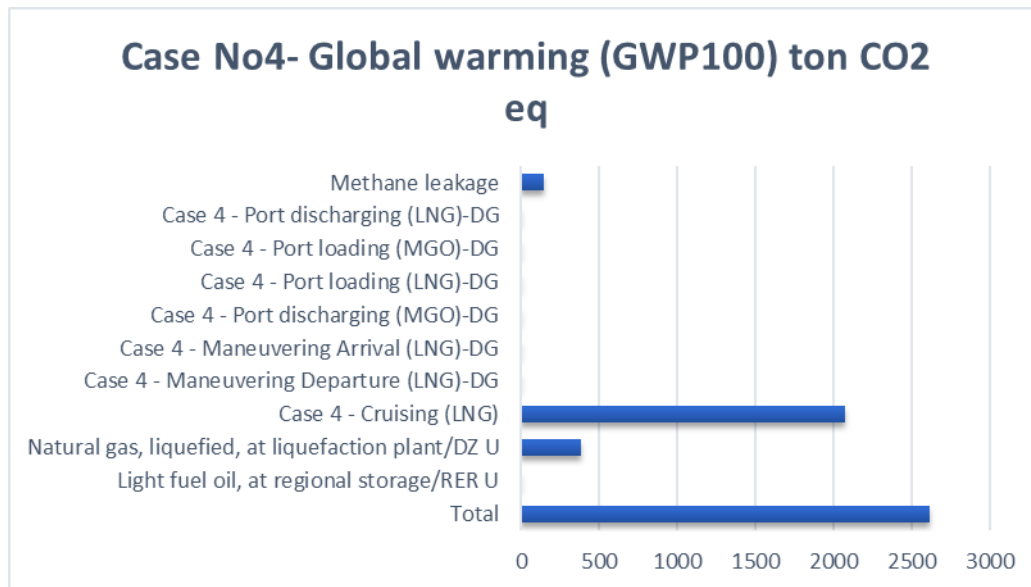
Το τέταρτο και τελευταίο case study αφορά το LNG carrier πλοίο. Η φόρτωση υποτέθηκε από τον τερματικό σταθμό LNG στο **Corpus Christi** των ΗΠΑ με προορισμό τον Ελληνικό Τερματικό Σταθμό στη **Ρεβυθούσα**.

Η συνολική διανυθείσα απόσταση είναι 6,337 ναυτικά μίλια όπου τα 956 βρίσκονται εντός της Αμερικανικής ECA. Δεν πραγματοποιείται κάποια εναλλαγή καυσίμου καθώς το χρησιμοποιούμενο LNG συμμορφώνεται με όλους τους κανονισμούς παγκοσμίως για εκπομπές ρύπων. Επίσης, το χρησιμοποιούμενο από τους δύο βοηθητικούς λέβητες ναυτιλιακό ντίζελ (MGO) είναι χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (0,1%).

### Case Study No4 - Ωρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile)

Case Study No4	Παραμονή σε λιμάνι (Port/ Anchorage Stay)	Ελιγμοί (Maneuvering)	Πλεύσιμη κατάσταση (Cruising)	Συνολικές Ωρες (Total hours)	Διανυθείσα απόσταση σε NM (distance covered in NM)
Ωρες Παραμονής	48	5	333.52	386.52	6337
Κατανάλωση MGO (MT)	7,57	0	0	-	-
Κατανάλωση LNG (MT)	71,5	7,14	560,56		

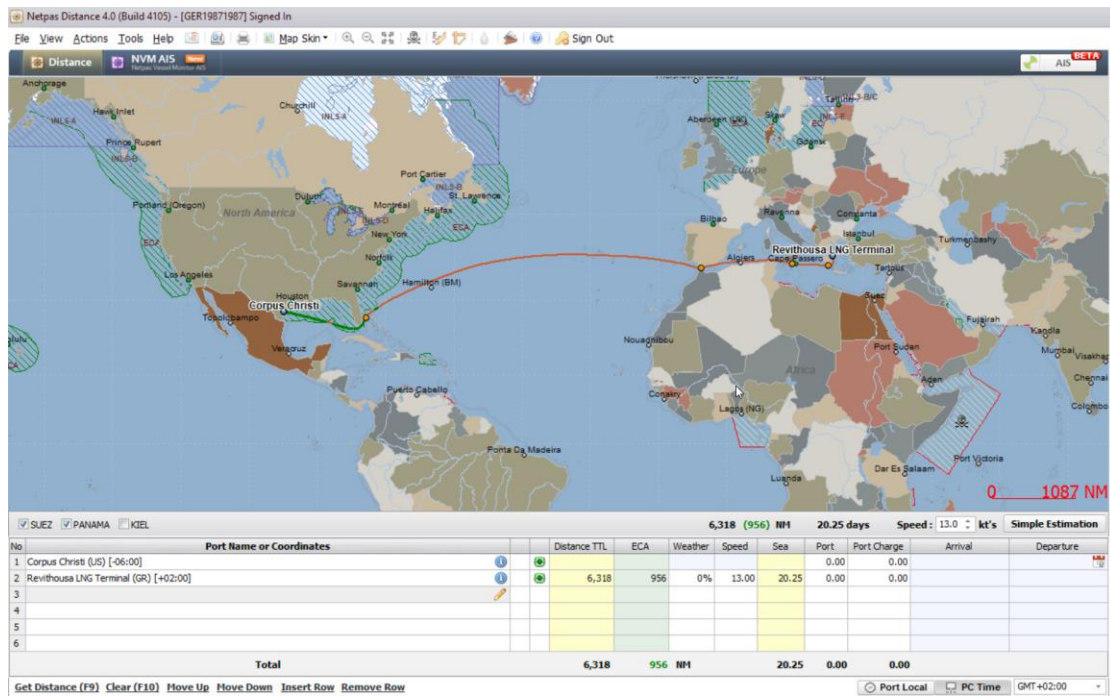
**Πίνακας 4.7.1** Case Study No4: Ωρες/ Καταναλώσεις ανά λειτουργικό προφίλ (Operational Profile).



**Σχήμα 4.7.2** Case Study No4: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κατάσταση πλεύσης.

Όπως και στο 3<sup>ο</sup> case study, τα σενάρια λειτουργίας των μηχανημάτων για το LNG carrier είναι ευγενική παραχώρηση του συναδέλφου, Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ, Χρήστου Μάγκου, ο οποίος εργάζεται στο τεχνικό τμήμα μεγάλης εταιρίας διαχείρισης LNG Carrier.

Οι συνολικοί υπολογισμοί και τα σενάρια λειτουργίας των μηχανημάτων του πλοίου προσαρτώνται στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι](#).



**Εικόνα 4.7.3** Το δρομολόγιο του 4<sup>ου</sup> case study που αφορά το LNG Carrier: Corpus Christi - Ρεβιθούσα. Πηγή: Netpass.

***Αποτελέσματα  
& Συγκρίσεις με  
4<sup>η</sup> Μελέτη GHG  
του IMO (2020)***

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν με το SIMAPRO. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν ξεχωριστά για καθένα από τα τέσσερα υπό μελέτη ταξίδια οι εξής παράμετροι:

- 1) Οι Well-to-tank (Upstream emissions) εκπομπές ανά ταξίδι.
- 2) Τις εκπομπές δυναμικού θέρμανσης πλανήτη εντός 100 ετών (Global Warming Potential 100) σε τόνους CO<sub>2</sub> (ton CO<sub>2</sub> equivalent) ανά υπό μελέτη ταξίδι και ανά κατάσταση πλοίου όπως: στο λιμάνι/ αγκυροβόλιο, κατά τη διάρκεια ελιγμών και πλεύσης.
- 3) Για κάθε ταξίδι/πλοίο υπολογίστηκαν οι παράμετροι EEOI, AER, DIST και TIME που χρησιμοποιούνται για την επίδραση των εκπομπών διοξειδίου του Άνθρακα στην Διεθνή Ναυτιλία και αναλύονται παρακάτω. Οι ίδιες παράμετροι μετρήθηκαν και στην 4<sup>η</sup> μελέτη του IMO για τα αέρια θερμοκηπίου (4<sup>th</sup> IMO GHG Study, 2020).

Οι παράμετροι είναι:

**A) EEOI (Energy Efficiency Operating Index, gCO<sub>2</sub>/tnm):** Δείκτης Λειτουργικής Ενεργειακής Απόδοσης. Ο Δείκτης λειτουργικής Ενεργειακής Απόδοσης (EEOI) αναπτύχθηκε από τον IMO προκειμένου τα πλοία να παρακολουθούν τις εκπομπές

άνθρακα. Ο ΕΕΟΙ είναι οι συνολικές εκπομπές άνθρακα σε μια δεδομένη χρονική περίοδο ανά τόνο-μίλι. Οι διακυμάνσεις του δείκτη προκαλούνται κυρίως από 3 παράγοντες: α) την τεχνική αποτελεσματικότητα του πλοίου, β) την ποσότητα του φορτίου που μεταφέρεται ανά μονάδα χρόνου και γ) τις διακυμάνσεις στην ταχύτητα. Ενώ μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τον ΕΕΟΙ σε ένα πλοίο, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η επίδραση των 3 αυτών παραγόντων.

**B) AER (Annual Efficiency Ratio, g CO<sub>2</sub>/dwt\*nm):** Λόγος ετήσιας αποδοτικότητας. Είναι παρόμοιος δείκτης με τον "ΕΕΟΙ". Η διαφορά έγκειται στο ότι χρησιμοποιεί το DWT (ή "TEU" ή επιβάτες ή ολική χωρητικότητα) αντί του πραγματικού μεταφερόμενου φορτίου και υποθέτει ότι το πλοίο μεταφέρει συνεχώς φορτίο. Αυτή η μέθοδος συνήθως δεν είναι πολύ ακριβής, επειδή τα πλοία δεν φορτώνονται πλήρως πάντα ή συχνά ταξιδεύουν άφορτα, σε κατάσταση έρματος.

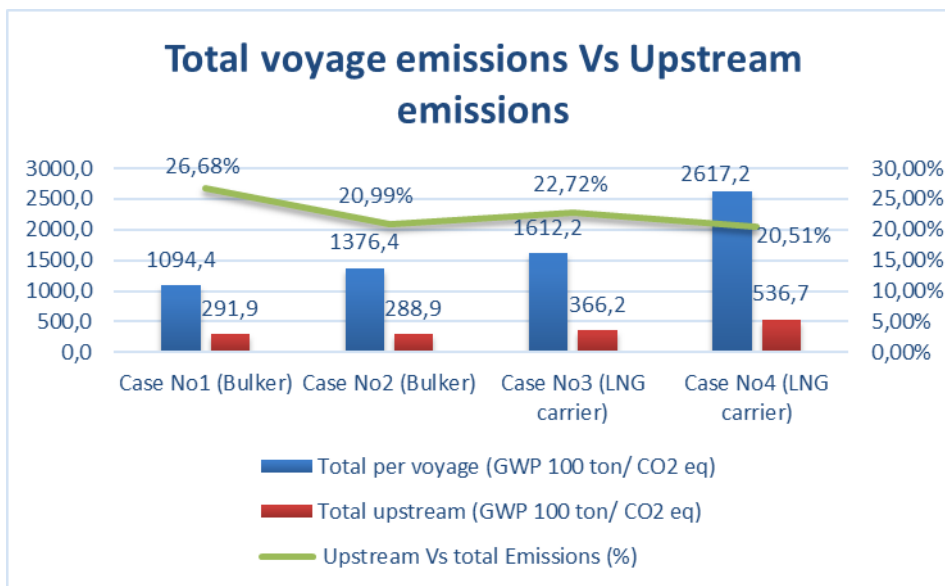
**Γ) DIST (Distance, Kg CO<sub>2</sub>/nm):** εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά διανυθείσα απόσταση σε nm (Kg CO<sub>2</sub>/ nm). Ο συγκεκριμένος δείκτης μας δίνει την ποσότητα εκπομπών ανά διανυθείσα απόσταση σε ναυτικά μίλια.

**Δ) TIME (CO<sub>2</sub> emissions/ hour underway, tCO<sub>2</sub>/ hour):** εκπομπές CO<sub>2</sub>/ ώρα πλεύσης. Ο δείκτης TIME μας δείχνει την ποσότητα εκπομπών CO<sub>2</sub> σε τόνους ανά ώρα.

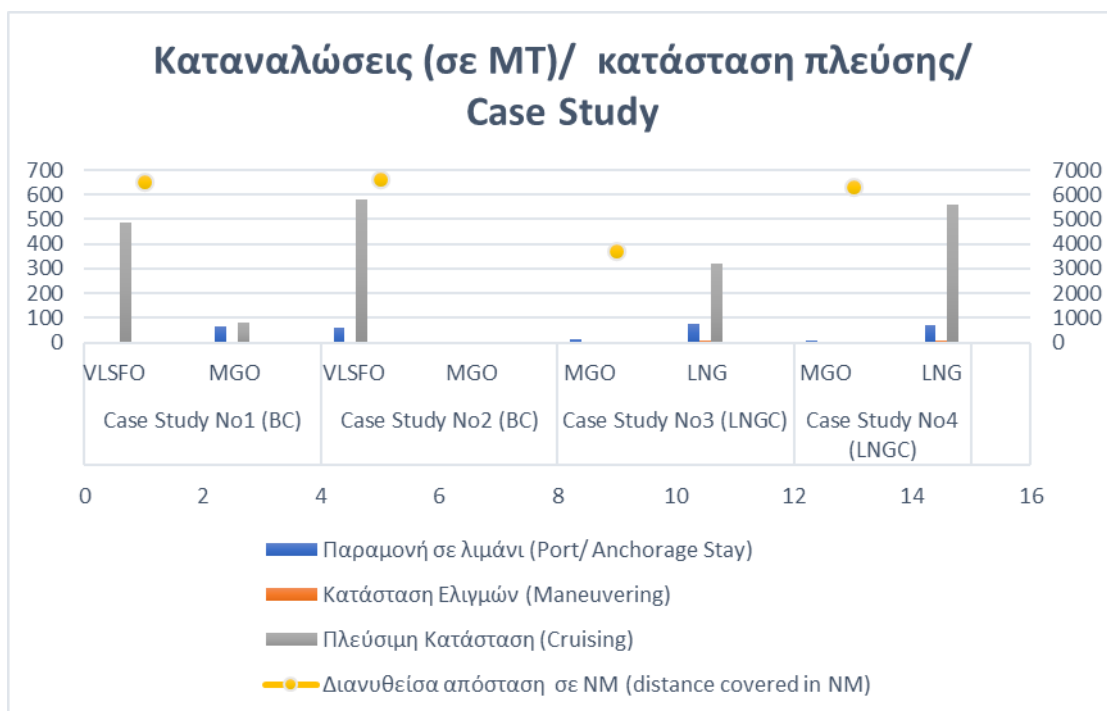
## ***5.1 Well to tank εκπομπές (upstream emissions) ανά ταξίδι.***

Οι Well-to-tank εκπομπές βασίστηκαν στα datasheets sheets του SIMAPRO 2, εκδ. 7.2. λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων βάσης. Επιπλέον, αμελήθηκαν σημαντικοί παράμετροι όπως η πραγματική απόσταση που διανύει το καύσιμο στη στεριά, ενδεχομένως έως τα διυλιστήρια, ο τρόπος μεταφόρτωσης του καυσίμου κ.α. Όπως φαίνεται στον [πίνακα 5.1.1.](#), οι well-to-tank εκπομπές, έναντι των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά ταξίδι παρατηρούμε ότι κυμαίνονται από 20,51% στο 4ο case study που αφορά το LNG carrier με μέγιστο το 26,28% στο 1<sup>ο</sup> case study που αφορά το Bulk Carrier. Οι συνολικές καταναλώσεις, επομένως τα είδη καυσίμων που λήφθηκαν υπόψη στην Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε κάθε ταξίδι αποτυπώνονται στον [πίνακα 5.1.2.](#)

Από τα παρακάτω λοιπόν διαγράμματα, διακρίνουμε ότι οι Well-to-tank εκπομπές αποτελούν πάνω από το 20% των συνολικών εκπομπών σε κάθε case study. Επιπλέον, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι μεταξύ case Study των case Studies No1 /No2 (Bulk Carrier και κυρίως VLSFO) και No3/ No4 (LNG carrier και LNG καύσιμο) διαπιστώνονται σημαντικά μεγαλύτερες well to tank εκπομπές στην περίπτωση που έχουμε LNG ως καύσιμο.



**Σχήμα 5.1.1** Συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά ταξίδι σε σύγκριση με τις Well-to-Tank εκπομπές ανά ταξίδι.



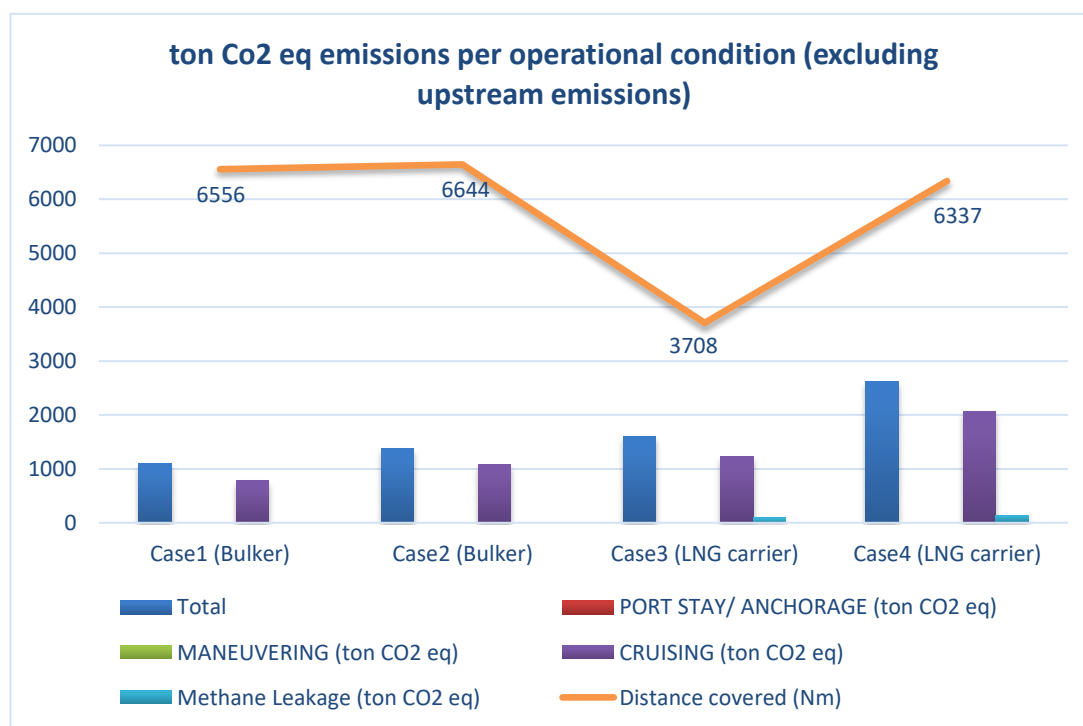
**Σχήμα 5.1.2** καταναλώσεις ανά κατάσταση πλεύσης, ανά Case Study.



## 5.2 Υπολογισμοί εκπομπών GWP 100 (σε ton CO<sub>2</sub> eq) ανά

### ταξίδι και κατάσταση πλοίου (λιμάνι, ελιγμούς, πλεύση).

Υπολογίστηκαν οι εκπομπές CO<sub>2</sub> (ton CO<sub>2</sub> equivalent) ανά πλεύσιμη κατάσταση πλοίου και ανά case study. Παρατηρούμε ότι στην κατάσταση πλεύσης το κάθε πλοίο παρουσιάζει μέγιστες εκπομπές CO<sub>2</sub> που αποτελεί μεγάλο ποσοστό των ολικών εκπομπών (μπλε στήλη). Αυτό συμβαίνει εύλογα διότι οι εκπομπές είναι ανάλογες των καταναλώσεων οι οποίες μεγιστοποιούνται όταν το πλοίο βρίσκεται στη φάση της πλεύσης. Οι εκπομπές που σχετίζονται στην έκλυση άκαυστου Μεθανίου στην ατμόσφαιρα (**methane slip or leakage**) ορίστηκαν **στο 1% της** τελικής κατανάλωσης LNG στα case studies Νο3 και Νο4 που αφορούν το LNG carrier <sup>[34]</sup>.



**Σχήμα 5.2.1** Συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά ταξίδι και κατάσταση πλοίου, εξαιρουμένων των Well-to-Tank εκπομπών.

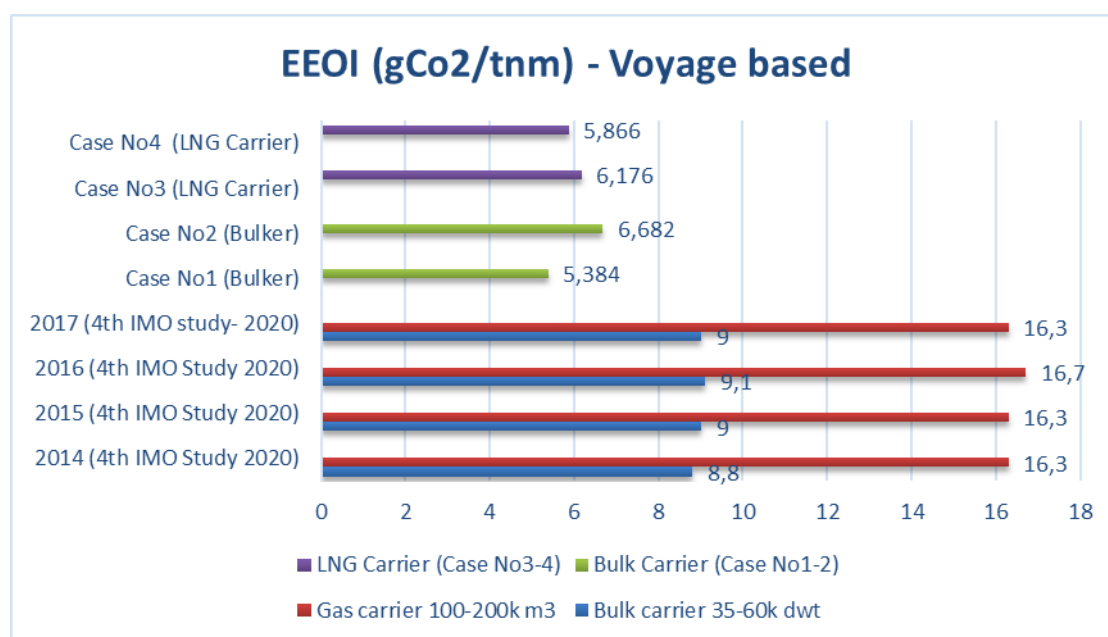
### 5.3 Υπολογισμοί παραμέτρων EEOI, AER, DIST και TIME

#### ανά ταξίδι και σύγκριση με 4<sup>η</sup> μελέτη GHG του IMO.

Και οι τέσσερις δείκτες υπολογίστηκαν ξεχωριστά για τα τέσσερα (4) υπό μελέτη ταξίδια και παρατίθεται σύγκριση με αντίστοιχου μεγέθους και κατηγορίας πλοία της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO. Συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν bulk carriers 35-60k dwt με το 38k dwt MV ΙΤΗΑΚΙ που είναι το υπό μελέτη bulk carrier και Gas carriers 100-200k m<sup>3</sup>, με το 160k m<sup>3</sup> υπό μελέτη LNG carrier. Τα έτη που λήφθηκαν υπόψη από την 4<sup>η</sup> μελέτη GHG είναι από το 2014 έως το 2017.

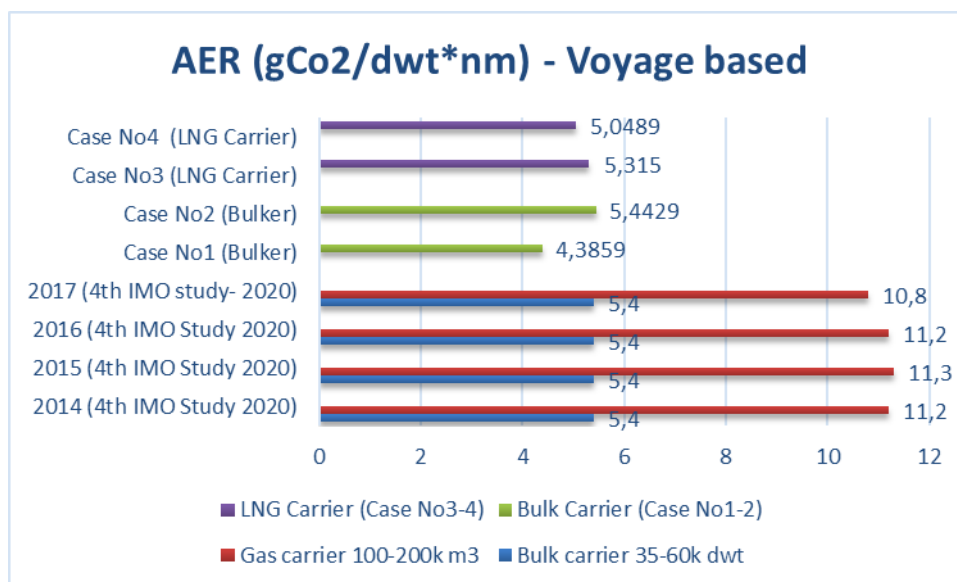
Τέλος, οι μετρήσεις που λήφθηκαν υπόψη από την μελέτη του IMO αφορούσαν υπολογισμούς ανά ταξίδι (voyage based) και όχι ανά χαρακτηριστικά πλοίου (vessel based) όπως υπολογιζόταν στην 3<sup>η</sup> μελέτη GHG του IMO [35].

Στις τιμές του EEOI, παρατηρείται σχετικά μεγάλη διαφορά μεταξύ του υπό μελέτη LNG carrier, με τιμές κοντά στα +/- 6g CO<sub>2</sub>/tnm, σε σχέση με τα Gas carrier της μελέτης του IMO όπου οι τιμές ξεπερνούν τα 16 gCO<sub>2</sub>/tnm. Αντίθετα, οι διαφορές στα bulk carriers είναι σημαντικά χαμηλότερες σχεδόν στα 3- 3,6 gCO<sub>2</sub>/tnm. Αυτό οφείλεται στη διαφορά καταναλώσεων των υπό μελέτη πλοίων τα οποία που χρησιμοποιούν δεδομένα από sea trials, σε αντίθεση με εκείνα των πλοίων της μελέτης του IMO τα οποία χρησιμοποιούν πραγματικές καταναλώσεις, συμπεριλαμβανομένων και άλλων σημαντικών παραμέτρων, όπως οι καιρικές συνθήκες, η ρύπανση της γάστρας, κλπ.



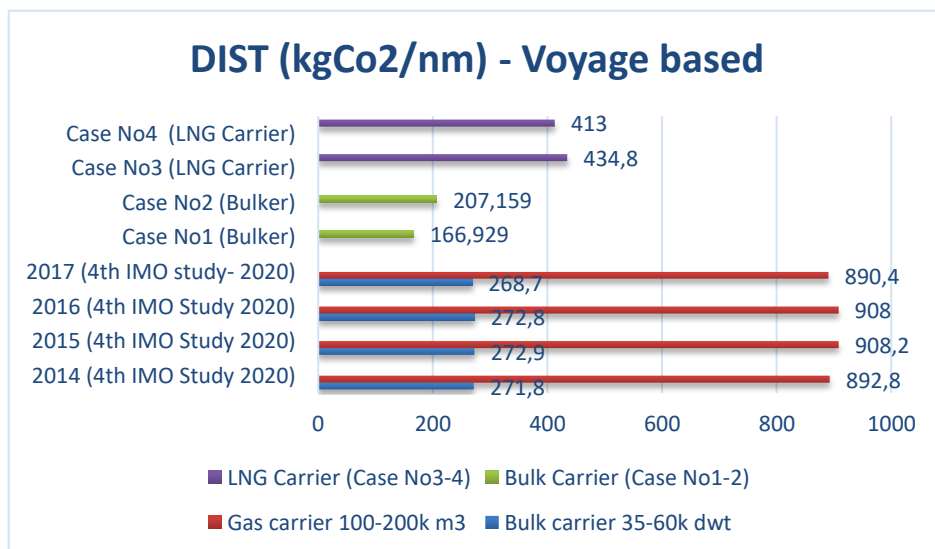
**Σχήμα 5.3.1** Υπολογισμός Energy Efficiency Operating Index (EEOI) για τις 4 υπό μελέτη περιπτώσεις και σύγκριση με τα έτη 2014-2017 της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO.

Στις τιμές του Annual Efficiency Ratio (AER), παρατηρείται διαφορά μεταξύ του υπό μελέτη LNG carrier με τιμές στα +/- 6g CO<sub>2</sub>/ tnm σε σχέση με τα Gas carrier της μελέτης του IMO, όπου οι τιμές ξεπερνούν τα 16 gCO<sub>2</sub>/ tnm. Αντίθετα, οι διαφορές στα bulk carriers είναι σημαντικά χαμηλότερες σχεδόν στα 3- 3,6 gCO<sub>2</sub>/ tnm. Και εδώ, όπως και στον δείκτη ΕΕΟΙ, οι διαφορές οφείλονται στα δεδομένα των καταναλώσεων.



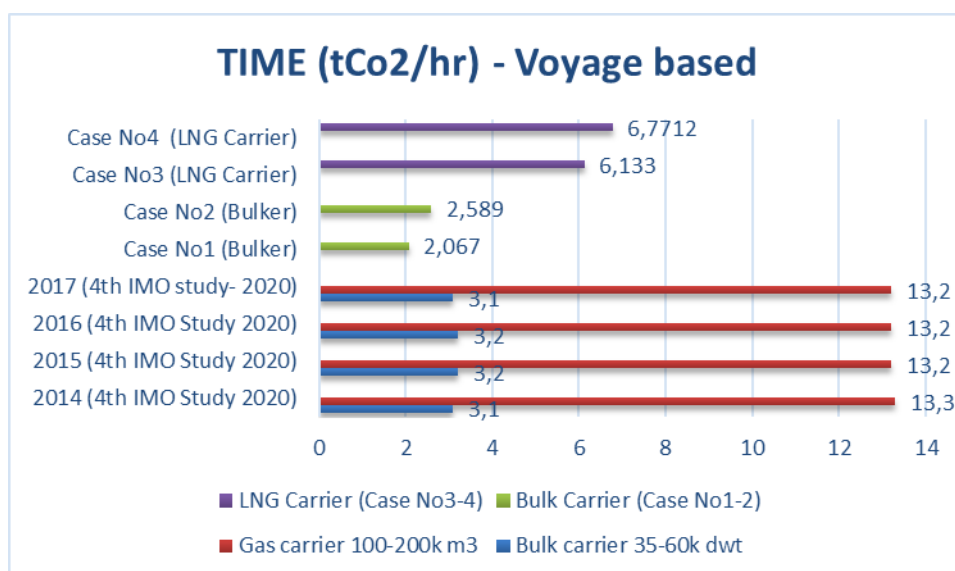
**Σχήμα 5.3.2** Υπολογισμός **Annual Efficiency Ratio (AER)** για τις 4 υπό μελέτη περιπτώσεις και σύγκριση με τα έτη 2014-2017 της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO.

Οι τιμές των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά απόσταση, σε ναυτικά μίλια (**DIST**) των Gas carrier της μελέτης του IMO εμφανίζονται διπλάσιες από εκείνες των υπό μελέτη LNG carrier και στα 2 ταξίδια. Ενδεικτικά, 413 έναντι 890 kg CO<sub>2</sub>/ nm. Όσον αφορά τα bulk carriers, οι διαφορές είναι σημαντικά χαμηλότερες και περιορίζονται το πολύ σε 90 kg CO<sub>2</sub>/ nm (166,9 έναντι 272,9 Kg CO<sub>2</sub>/ nm). Στην ανάλυση του DIST, οι διαφορές στα LNG carriers οφείλονται πιθανότατα στην εγκυρότητα του όγκου των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub> σε σχέση με την διανυθείσα απόσταση. Οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> σχετίζονται άμεσα με τις καταναλώσεις καυσίμου όπου προφανώς οι πραγματικές καταναλώσεις των πλοίων της μελέτης του IMO, έχουν μεγάλη απόκλιση με εκείνες των θαλασσίων δοκιμών οι οποίες λήφθηκαν υπόψη στα υπό μελέτη πλοία.



**Σχήμα 5.3.3** Υπολογισμός **DISTANCE (DIST)** για τις 4 υπό μελέτη περιπτώσεις και σύγκριση με τα έτη 2014-2017 της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO.

Τέλος, οι τιμές των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά πλεύσιμη ώρα (**TIME**) των Gas carrier της μελέτης του IMO εμφανίζονται περίπου διπλάσιες από εκείνες του υπό μελέτη LNG carrier και στα 2 case studies. Δηλαδή 6,7 έναντι 13,2 ton CO<sub>2</sub>/hour. Όσον αφορά τα bulk carriers, οι διαφορές είναι αρκετά χαμηλότερες με μέγιστη τα 106 kg CO<sub>2</sub>/ nm (166,9 έναντι 272,9 kg CO<sub>2</sub>/ nm). Όπως και στην περίπτωση του DIST, έτσι και στον υπολογισμό του TIME, οι διαφορές σχετίζονται με τις καταναλώσεις όπου οι πραγματικές, παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με εκείνες των θαλασσιών δοκιμών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στα υπό μελέτη πλοία.



**Σχήμα 5.3.4** Υπολογισμός **TIME** για τις 4 υπό μελέτη περιπτώσεις και σύγκριση με τα έτη 2014-2017 της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO.

Η Ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ) μπορεί να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για την αποτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των μεταφορών στη Ναυτιλία. Μέχρι σήμερα και ενώ το νομοθετικό πλαίσιο του IMO για την απανθρακοποίηση στην πορεία για το 2050, δεν έχει ξεκαθαριστεί πλήρως, υπάρχουν ακόμα αρκετά «γκρίζες» περιοχές όπως ο υπολογισμός των Well-to-Tank (Upstream) εκπομπών GHG για τα οποία δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία ώστε να μπορέσει να υπολογιστεί μια πλήρης AKZ, για κάθε ταξίδι, κάθε πλοίου.

Στην παρούσα εργασία, για τις Well-to-Tank εκπομπές χρησιμοποιήθηκαν τα datasheets που διατίθενται στο λογισμικό SIMAPRO με το οποίο έγιναν οι υπολογισμοί. Εάν ωστόσο εισαχθούν οι πραγματικές καταναλώσεις πλοίων για τον υπολογισμό των Tank-to-Propeller εκπομπών, μαζί με αξιόπιστα δεδομένα για τις Well to Tank εκπομπές, θα μπορούμε να έχουμε μία αξιόπιστη και ολοκληρωμένη AKZ, Well-To-Propeller, που θα μπορούμε να εξάγουμε χρήσιμα αποτελέσματα για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάποιου πλοίου ανά συγκεκριμένο ταξίδι.

### **6.1 Επιμέρους συμπεράσματα**

Τα επιμέρους συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία είναι τα εξής:

- Το γεγονός ότι στη μελέτη λήφθηκαν υπόψη οι καταναλώσεις των πλοίων κατά τις θαλάσσιες δοκιμές (sea trials) συνετέλεσε στο να εξαχθούν μικρότερες εκπομπές GHG από εκείνες που τα πλοία θα εξέπεμπαν στην πραγματικότητα. Αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς οι εκπομπές είναι ανάλογες των καταναλώσεων ο οποίες μεγιστοποιούνται στο στάδιο της πλεύσης, όταν δηλαδή το πλοίο ταξιδεύει στο πέλαγος.
- Οι μικρότερες τιμές των παραμέτρων EEOI, AER, DIST και TIME, με μικρές ωστόσο διαφορές, του υπό μελέτη Bulk Carrier σε σχέση με αντίστοιχου μεγέθους πλοία της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO (2020) οφείλονται στις καταναλώσεις που εισήχθησαν στο

SIMAPRO οι οποίες πάρθηκαν από τις θαλάσσιες δοκιμές και όχι από πραγματικές καταναλώσεις των πλοίων.

- Οι μικρότερες τιμές, με σχετικά μεγάλες διαφορές των παραμέτρων EEOI, AER, DIST και TIME του υπό μελέτη LNG Carrier σε σχέση με αντίστοιχου μεγέθους πλοία της 4<sup>ης</sup> μελέτης GHG του IMO (2020) οφείλονται στην μεγάλη απόκλιση των καταναλώσεων των sea trials από τις πραγματικές καταναλώσεις του πλοίου.
- Ο κατά προσέγγιση υπολογισμός των Well-to-tank (upstream) εκπομπών μέσω δεδομένων που περιλαμβάνει το SIMAPRO στερεί από την εργασία την προσέγγιση μιας ακριβέστερης και ολοκληρωμένης ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) από την οποία θα μπορούσαν να εξαχθούν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για τα ταξίδια που αναφέρθηκαν. Σε πραγματικές συνθήκες, θα μπορούσε να εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία σε πλοία σταθερών γραμμών, όπως πλοία εμπορευματοκιβωτίων (containerships), επιβατηγά (passenger ferries), κλπ., παρέχοντας πληροφορίες με στόχο την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτύπου των πλοίων.
- Η έκλυση Μεθανίου στην ατμόσφαιρα (methane slip or leakage) που υπολογίστηκε στο 1% <sup>[34]</sup> σε σχέση με τις ολικές εκπομπές GHG, ανά ταξίδι του υπό μελέτη LNG carrier είναι διόλου αμελητέα, όπως φαίνεται στο [Σχήμα 5.2.1](#), καθώς το Μεθάνιο είναι 25 φορές πιο ισχυρό ως αέριο θερμοκηπίου από το διοξείδιο του άνθρακα

## 6.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Σχετικά με τις παραμέτρους EEOI, AER, DIST και TIME που υπολογίστηκαν στην εργασία, οι μικρότερες τιμές σε σχέση με εκείνες των αντίστοιχων πλοίων της 4<sup>ης</sup> **Μελέτης GHG του IMO** <sup>[1]</sup> οφείλονται αρχικά στη διαφορά των καταναλώσεων, καθώς στην εργασία λάβαμε υπόψη τις καταναλώσεις πλοίων κατά τη διάρκεια των θαλάσσιων δοκιμών ενώ στη Μελέτη του IMO λαμβάνονται υπόψη οι απολύτως πραγματικές καταναλώσεις οι οποίες δηλώνονται σε ετήσια βάση, βάσει του Κανονισμού για την κατανάλωση πλοίων <sup>[3]</sup>. Επίσης, δεν λήφθηκαν υπόψη οι καιρικές συνθήκες και η ρύπανση της γάστρας που οδηγούν σε αυξημένες καταναλώσεις τα πλοία κατά την κατάσταση πλεύσης. Αντίθετα, το γεγονός ότι ειδικά στο Bulk Carrier πλοίο, οι διαφορές με τα νούμερα του IMO είναι σχετικά μικρές οφείλεται κατά μεγάλο μέρος στο ότι η υπόθεση για τα μηχανήματα τα οποία υποτέθηκαν ότι λειτουργούν σε κάθε φάση πλεύσης είναι έγκυρη και πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Τα σενάρια λειτουργίας των μηχανημάτων και οι καταναλώσεις συνοψίζονται στο [ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι](#).

### **6.3 Βελτίωση αποτελεσμάτων**

Σχετικά με την βελτίωση των αποτελεσμάτων, θα ήταν καταλυτικής σημασίας, ως προς την εγκυρότητα των αναλύσεων, οι καταναλώσεις των πλοίων να αναφέρονταν σε πραγματικά δεδομένα καταναλώσεων (και όχι θαλασσίων δοκιμών) τα οποία όμως θα παρουσίαζαν σημαντικές αυξομειώσεις καταναλώσεων λόγω των καιρικών συνθηκών ή και ρύπανση της γάστρας.

Επιπλέον, η εγκυρότητα των Well-To-Tank εκπομπών θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά εάν λαμβάνονταν υπόψη οι αποστάσεις μεταφοράς των καυσίμων από το στάδιο της εξόρυξης, έως το διυλιστήριο και την τελική διάθεση των καυσίμων μέχρι τη δεξαμενή των πλοίων, τις εκπομπές από τα πλοία ανεφοδιασμού (bunkering barges) για τα λιμάνια που αναφέρονται στην μελέτη και όχι γενικά για ορισμένες χώρες όπως αναφέρονται στα datasheets του SIMAPRO.

1. IMO, “Fourth IMO Greenhouse Gas Study”, 2020
2. <https://theloadstar.com/imo-moves-to-address-well-to-tank-emissions-from-shipping/> 21/03/2022
3. IMO, MEPC.278(70) “Data collection system for fuel oil consumption of ships”, 2018
4. [https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5482/3/02\\_chapter\\_6.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/5482/3/02_chapter_6.pdf)
5. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/GHG-Emissions.aspx>
6. MARITIME «Assessment of selected alternative fuels and technologies” DNV presentation - June 2019.
7. « Exhaust gas scrubber systems, what you need to know”, Bureau Veritas – Marine & Offshore Division, presentation – April 2015.
8. [https://ec.europa.eu/clima/policies/innovation-fund\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/innovation-fund_en) 04/05/21
9. European Community Shipowners Association. “Implications of application of the EU Emissions Trading System (ETS) to International shipping, and potential benefits of alternative Market-Based Measures (MBMs)”, July 2020.
10. Στούρνας Σ., Λόης Ε., Ζαννίκος Φ. & Καρώνης Δ. «Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών για φοιτητές Σχολών Μηχανολόγων Μηχανικών και Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα, εκδόσεις ΕΜΠ 2007
11. CE Delft, Stratas Advisors, UMAS, NMRI, Petromarket Research Group, Shinichi Hanayama, “Assessment of fuel oil availability” – Final Report, CE Delft, July 2016.
12. <https://dieselnet.com/standards/us/fuel.php>
13. <https://afi.DNV.com>, 25/09/2022



14. International Gas Union, “World LNG Report”, 2019
15. National Institute for Occupational Safety and Health (August 22, 2008). "The Emergency Response Safety and Health Database: Methanol". Retrieved March 17, 2009
16. “0,5% S fuel operation 2020, Energy Solutions”, MAN B&W - Aug 2019.
17. <https://www.theseanation.gr /καύσιμα υδρογόνου εξετάζει η CMA/CGM – 15/02/2020>.
18. “Comparison of Alternative Marine Fuels”, DNV Study obo Sea/LNG Ltd, 16th September 2019.
19. <https://www.e-mc2.gr/el/node/1621> , 12 Απριλίου 2020
20. “Maritime Forecast to 2050 - nergy Transition Outlook 2019”, DNV Study, 2019
21. Brynolf et al., 2018
22. <https://www.naftikachronika.gr/2019/11/11/sto-epikentro-i-technologia-tis-chrisis-batarion-gia-tin-proosi-ton-ploion/> 13 Απριλίου 2020
23. Καφετζής Α., «Βελτιστοποίηση λειτουργίας αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος ισχύος με αναμόρφωση υγραερίου και κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας» - Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ- Θεσ/νικη 2017
24. MARITIME «Study on the use of fuel cells in Shipping” DNV Study - 2017.
25. Kang, D.W.; Holbrook, J.H. Use of NH<sub>3</sub> fuel to achieve deep greenhouse gas reductions from US transportation. Energy Rep. 2015, 1, 164–168
26. <https://www.wartsila.com/media/news/30-06-2020-world-s-first-full-scale-ammonia-engine-test--an-important-step-towards-carbon-free-shipping-2737809/> 30/06/2020.
27. <https://m.naftemporiki.gr/story/1563927/prasini-ammonia-os-kausimo-gia-ploia/> 20/02/2020.
28. Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ., Σλίνη, Θ. 2015. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ. [Κεφάλαιο Συγγράμματος]. Στο Μουσιόπουλος, Ν., Ντζιαχρήστος, Λ., Σλίνη, Θ. 2015. *Τεχνική προστασία περιβάλλοντος*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 11.
29. Α. Καλογερόπουλος, «Αξιολόγηση AKZ στην μηχανική βιολογική

επεξεργασία (MBE) των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ): περίπτωση μελέτης το εργοστάσιο μηχανικής ανακύκλωσης & κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ) Αττικής » - Χαροκόπειο Παν/μιο, Τμήμα οικιακής οικονομίας & οικολογίας – 2020

30. S. Bengtsson, “Life Cycle Assessment of present and future marine fuels”, Chalmers University of Technology, Department of Shipping and Marine Technology, Gothenburg, Sweden, 2011
31. Ε. Κωνσταντάτου, «Ο Κύκλος Ζωής του πλοίου» - ΠΑΝ/ΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ, Τμήμα Ναυτιλίας και επιχειρηματικών υπηρεσιών – 20117
32. Χ. Τζεγιαννάκης, «Εφαρμογή της ΑΚΖ σε ξενοδοχειακές μονάδες των Χανίων για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της τουριστικής δραστηριότητας » - ΑΠΘ, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών – 2018
33. Γ. Ανδριανόπουλος, «Ανάλυση Κύκλου Ζωής της χρήσης Βιο-καυσίμων στη ναυτιλία με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή» - σελ.70 - Πολυτεχνείο Κρήτης – Τμήμα ΗΜ/ΜΥ.
34. Δ. Γιαννόπουλος- Μ. Φούντη, “Ανάλυση Κύκλου Ζωής Ναυτικών Καυσίμων Case Study” – LNG fugitive emissions/σελ. 35, ΕΜΠ, Σχολή Μηχ. Μηχανικών, Αθήνα, 2022
35. IMO, “Third IMO Greenhouse Gas Study”, 2014

8

*Παράρτημα Ι: Καταναλώσεις – Καταστάσεις πλεύσης των  
4 case studies*

# No1 Case – Bulk Carrier

## CASE STUDY No1: 38k dwt BULK CARRIER on VOYAGE: Corpus Christi - Thessaloniki (6,556 NM)

SHIPS NAME:	MV ITAKI
TYPE:	BULK CARRIER
ROUTE (FROM):	Corpus Christi, TX - US
ROUTE (TO):	Thessaloniki, GREECE
TOTAL DISTANCE (NM):	6556 (956 within US ECA)
Kilometers (km):	12142
Total Steaming (Hrs):	539.33
Cargo (wheat MT):	31000
Tkt:	376371000

<b>Κατάσταση:</b>	Ελλιμενισμός (at port) με δραστηριότητα φορτώσης χωρίς χρήση γραναύων του πλοίου
	Καύσιμο: MGO (US ECA)
Κατανάλωση Καυσίμου (MJ/kg)	40,34
Δυναμική Απόδοση (NM):	0
Έξος Παρεμίας στην κατάσταση:	96
Ταχύτητα (kts):	5
Ταχύτητα (knots):	0
Ημέρες:	4

<b>ΜΕΤΑΦΟΡΑ</b>	K/M (gms)	HIT No1 (GPM No1)	HIT No2 (GPM No2)	HIT No3 (GPM No3)	B/A No1 (A/B No1)
	OKI	NAI	OKI	OKI	NAI
Σε λειτουργία (NAI/OKI):	OKI	NAI	OKI	OKI	NAI
Στροφή (rpm):	-	900 rpm	-	-	-
Φορτίο (KW):	-	220	-	-	-
Φορτίο Engine Load (f100):	0	0,75	0	0	0
Ονομαστική κατανάλωση/24ωρο:	0	1,24	0	0	1,836
Προσμετρούλη κατανάλωση (MT):	0	4,96	0	0	7,344

<b>TOTAL PER PHASE</b>	Black Carbon Emissions (ton/ ton Fuel)	0,0004216
	Dinitrogen MonoXide N2O (ton/ ton Fuel)	0,00221472
	Methane CH4 (ton/ ton Fuel)	0,00073824
	Carbon Dioxide CO2 (ton/ ton Fuel)	39,446234
	Kwh/tonneKm:	0
	KgFO/Kwh:	0
	KgMGO/Kwh:	0

<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ</b>	ΣΥΝΟΛΙΚΑ KgMGO/Kwh	0,07
	ΣΥΝΟΛΙΚΑ KgFO/Kwh	0,06
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ (Kwh/ tonnekm)</b>	ΣΥΝΟΛΙΚΑ (Kwh/ tonnekm)	29,43
	ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ Kwh/ km:	1297,52
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ</b>	VLSFO Black Carbon Emissions (ton/ ton Fuel)	0,09
	VLSFO Dinitrogen MonoXide N2O (ton/ ton Fuel)	0,09
	VLSFO Methane CH4 (ton/ ton Fuel)	0,03
	VLSFO Carbon Dioxide CO2 (ton/ ton Fuel)	1557,98
	MGO Black Carbon Emissions (ton/ ton Fuel)	0,01
	MGO Dinitrogen MonoXide N2O (ton/ ton Fuel)	0,03
	MGO Methane CH4 (ton/ ton Fuel)	0,01
	MGO Carbon Dioxide CO2 (ton/ ton Fuel)	468,63
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ MGO (MT)</b>		<b>145,674</b>
<b>ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ VLSFO (MT)</b>		<b>480,741</b>

<b>Κατάσταση πλεύσης (Maneuvering + Cruising) DEPARTURE</b>	MGO (US EEZ/ECA)
	40,34
	1,5
	79,58
	12,5
	22,224
	0,31
	0,2416

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	MGO (US EEZ/ECA)
	40,34
	955
	5600
	448
	12,5
	23,15
	19,66

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Ελλιμενισμός (at port) με δραστηριότητα εκφορτώσης με χρήση γραναύων του πλοίου</b>	MGO (EU Directive)
	40,34
	0
	144
	0
	0
	11,112
	0,031
	0

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	MGO (US EEZ/ECA)
	40,34
	955
	5600
	448
	12,5
	22,224
	0,31
	0,2416

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Ελλιμενισμός (at port) με δραστηριότητα εκφορτώσης με χρήση γραναύων του πλοίου</b>	MGO (EU Directive)
	40,34
	0
	144
	0
	0
	11,112
	0,031
	0

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Ελλιμενισμός (at port) με δραστηριότητα εκφορτώσης με χρήση γραναύων του πλοίου</b>	MGO (EU Directive)
	40,34
	0
	144
	0
	0
	11,112
	0,031
	0

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Ελλιμενισμός (at port) με δραστηριότητα εκφορτώσης με χρήση γραναύων του πλοίου</b>	MGO (EU Directive)
	40,34
	0
	144
	0
	0
	11,112
	0,031
	0

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Κατάσταση πλεύσης (Cruising)</b>	VLSFO
	39
	1
	0,75
	6
	11,112
	0,031

<b>Ελλιμενισμός (at port) με δραστηριότητα εκφορτώσης με χρήση γραναύων του πλοίου</b>	MGO (EU Directive)
	40,34
	0
	144
	0
	0
	11,112
	0,031
	0

<b>EMISSION FACTORS Tank-to-Propeller (g/g Fuel)</b>				
<small>(Source: ECA, Ceres &amp; Oasys)</small>				
Fuel	Black Carbon	Dinitrogen (N2O)	Methane (CH4)	Carbon Dioxide
VLSFO	0,00019	0,00018	0,00006	3,188
MGO	0,00004	0,00018	0,00006	3,206



## No3 Case – LNG Carrier

### CASE STUDY No3: 160k m3 LNG CARRIER on VOYAGE: Ras Laffan - Revithousa (3,708 NM)

SHIP'S NAME: ME "LNG" class TTCC standard design"														
TYPE: LNG CARRIER														
ROUTE (FROM): Ras Laffan (LNG Terminal), Qatar														
ROUTE (TO): Revithousa, GREECE														
TOTAL DISTANCE (NM): 3708														
Minimum (Days): 65/67														
Total tonnage (mt): 232,37														
Total Cargo (m3) (LNG): 120000 M3														
LNG Density (t/m3): 4.4														
Total Cargo (mt) in total: 70000														
Tax: 483430000														

Στοιχείο	Εξουσιοδότηση ETO RE LNG Terminal (loading at port)		Pilot on Board Departure from RE + Κατανάλωση Λαγέρων (Monitoring)		Crewing		Pilot on Board Departure + pilotage at Ras Laffan		Crewing		Pilot on Board Arrival + Κατανάλωση Λαγέρων (Monitoring)		Εξουσιοδότηση στην PE (Delivery LNG Terminal (unloading at port)	
	<b>ΚΑΥΣΙΜΟ: (US ECA) LNG + MGO</b>		<b>LNG (US ECA)</b>		<b>LNG</b>		<b>LNG (US ECA)</b>		<b>LNG</b>		<b>LNG</b>		<b>LNG (EU DERICTIVE) + MGO</b>	
	US ECA (kg)	MGO (kg)	LNG (kg)	US ECA (kg)	MGO (kg)	LNG (kg)	US ECA (kg)	MGO (kg)	LNG (kg)	US ECA (kg)	MGO (kg)	LNG (kg)	MGO (kg)	
Μεταβλητή Κατανάλωση (g/GJ)	41.92	46.34	41.92	41.92	41.92	41.92	41.92	41.92	41.92	41.92	41.92	41.92	46.34	
Προσφάτος Στόχος (%)	26	3	190.26	15	31.92	2	1.29	1.29	0.08	0.08	0.08	0.08	1.98	
Μεταβλητή	0	5	19	8	19	5	5	5	5	5	5	5	0	
Μεταβλητή	0	5.25	36.15	14.8	36.15	5.25	36.15	5.25	36.15	5.25	36.15	5.25	0	
Ανεπίσημη	0	1	3020	120	807	1	807	1	807	1	807	1	0	

MEASUREMENTS	Στα Καύσιμα (MGO)		LNG		US ECA		MGO		US ECA		MGO		US ECA		MGO	
	KM/Weight	KM/Volume	KM/Weight	KM/Volume	KM/Weight	KM/Volume	KM/Weight	KM/Volume	KM/Weight	KM/Volume	KM/Weight	KM/Volume	KM/Weight	KM/Volume	KM/Weight	KM/Volume
	WT/1000P	WT/1000V	WT/1000P	WT/1000V	WT/1000P	WT/1000V	WT/1000P	WT/1000V	WT/1000P	WT/1000V	WT/1000P	WT/1000V	WT/1000P	WT/1000V	WT/1000P	WT/1000V
Στα Καύσιμα (MGO)	N/A1	N/A1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Φαγίτιο Engine Load (%)	0.5	0.5	0	0.75	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	0	0.5	0.5	0
Φαγίτιο (MW)	5706	5706	0	4368	0	0	0	0	5706	5706	0	5850	0	5706	5706	0
Σταθμική (MPa)	514	514	514	514	-	-	-	-	514	514	514	-	-	514	514	-
Ονομαστική καταπόνηση (ΜPa)	31.36	31.36	0	21.66	5.44	0	0	0	31.36	31.36	0	28.94	0	31.36	31.36	0
Προσφάτος καταπόνηση (MPa)	33.90	33.90	0	23.84	0.00	0	0	0	33.90	33.90	0	19.56	0	33.90	33.90	0
Προσφάτος καταπόνηση (MPa)	14.82	14.82	0	10.56	5.44	0	0	0	14.82	14.82	0	16.84	0	14.82	14.82	0
Συνολική καταπόνηση (MPa)	36.99	36.99	0	26.44	5.44	0	0	0	36.99	36.99	0	22.96	0	36.99	36.99	0
Συνολική καταπόνηση (MPa)	90.96	90.96	0	69.88	0.00	0.00	0.00	0.00	90.96	90.96	0	71.92	0	90.96	90.96	0
Black Carbon Emissions (ton/ton fuel)	0.0001	0.0001	0.0000	27.8623	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Dibromogen Monoxide N2O (ton/ton fuel)	0.0033	0.0033	0.0000	0.9023	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0033	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Methane CH4 (ton/ton fuel)	0.0231	0.0231	0.0000	0.2149	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0231	0.0231	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Carbon Dioxide CO2 (ton/ton fuel)	41.0036	41.0036	0.0000	27.8623	17.4464	0	0	0	41.0036	41.0036	0.0000	0.0000	0	41.0036	41.0036	0
Black Carbon Emissions (ton/ton fuel)	27.8626	0.0000		0.0000				0.0000	27.8626	0.0000			0.0000			0.0000
Dibromogen Monoxide N2O (ton/ton fuel)	0.0066	0.0000		0.0000				0.0000	0.0066	0.0000			0.0000			0.0000
Methane CH4 (ton/ton fuel)	0.0560	0.0000		0.0000				0.0000	0.0560	0.0000			0.0000			0.0000
Carbon Dioxide CO2 (ton/ton fuel)	136.70	17.4468		11.99				3271.34	136.70	17.4468			11.99			18.059

VOYAGE DATA	Black Carbon		Dibromogen Monoxide		Methane		Carbon Dioxide	
	Black Carbon	Dibromogen	Methane	Carbon Dioxide	Black Carbon	Dibromogen	Methane	Carbon Dioxide
	mt	mt	mt	mt	mt	mt	mt	mt
Black Carbon	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Dibromogen Monoxide	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Methane	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Carbon Dioxide	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

# No4 Case – LNG Carrier

SHIPS NAME: MT 1200 (6m TPIE standard design)  
 TYPE: LNG CARRIER  
 ROUTE (FROM): Corpus Christi, TX - US  
 ROUTE (TO): Revithoussa, GREECE  
 TOTAL DISTANCE (NM): 6337 (936 within ECA)  
 Kilometers (km): 11736  
 Total Steaming (hrs): 390,52  
 Total Cargo (LNG in m3): 163000  
 LNG Density (MT/m3): 0,444  
 Total Cargo (LNG in tons): 72400  
 \*Nm: 636224400

## CASE STUDY No4: 160k m3 LNG CARRIER on VOYAGE: Corpus Christi - Revithoussa (6,337 NM)

Κατάσταση	Επιχειρηστές ITO CT LNG Terminal (loading at port)						Pilot on Board Departure + Κατάσταση ελεύθρου (Maneuvering)						Cruising						Pilot on Board Arrival + Κατάσταση ελεύθρου (Maneuvering)						Επιχειρηστές στην Περίθωλο LNG Terminal (discharging at port)																				
Καύσιμο:	US ECA LNG + MGO						LNG (US ECA)						LNG						LNG						LNG (EU DERIVATIVE) + MGO																				
Heat No (Heat Units)																																													
Komou, Οργανισμός Νέστας (Mt Kgt)	41,92						41,92						41,92						41,92						41,92						40,34														
Παράγωγο BOG (% από εφόδο)																																													
Εφόδο		22						3				333,52		2																					26										
Νέστας		0,1916						0,125				13,96																						1,08											
Αρτήματα (kg)		0						5				19																						0											
Αρτήματα (kg)		0						9,25				35,15																						0											
Δενδροποιημένο Αρτήματα (kg)		0						1				1																						0											
Σύνολο Αρτήματα παραγωγικών οχημάτων για την κατάσταση ελεύθρου: 16,200 kW																																													
ΜΕΤΑΒΗΜΑΤΑ																																													
Σε Διαδρομή (NMI/CR)	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	K/M Wartsila W2V95D F No4	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)	Βιομηχανικός Αέρας, No4 (kg/m3)									
Φορτίο Engine Load (P100)	0,5	0,5	0	0,75	-	0	1				0,75						1				0,75			1				0,5				1				0,5			1				0,75		
Φορτίο (kW)	5708	5708	0	4368	-	0	11526				4368						11526				4368			5708	5708		3626				5708	5708		4368											
Σηροί (rpm)	514	514	514	-	-	0	514				514	-	-	0	514	514	514	-	-	0	514	514	514	-	-	0	514	514	514	-	-	0	514	514	514	-	-	0							
Ονομαστική καταπόνηση/24ωρο	31,38	31,38	0	21,98	5,44	0	57,8				21,98				31,38	31,38	26,94				31,38	31,38	19,84				31,38	31,38	19,84				57,8	57,8	0	21,98	5,44	0							
Πραγματική καταπόνηση (M3)	28,75	28,75	0	19,36	4,96	0	7,2	0	0	2,71	0	0	436,01	436,01	0	401,98	0	0	2,81	2,81	0	1,27	0	0	62,208	62,208	0	23,4144	0	5,8782															
Πραγματική καταπόνηση (M7)	12,85	12,85	0	8,53	4,96	0	3,168	0	0	1,20	0	0	191,84	191,84	0	175,87	0	0	1,10	1,10	0	0,56	0	0	27,3182	27,3182	0	10,302336	0	2,585086															
Συνολικός καταπόνησης (MT)		33,83				4,86		4,37			0		969,86		0		2,77		0		6,29		0		37,87		2,88		37,87		2,88														
Συνολικός καταπόνησης (M3)		78,96				0		9,91			0		127,89		0		6,29		0		6,29		0		85,92		6,62		85,92		6,62														
Συνολικός καταπόνησης (kg)		0,00043651				0,00		0,00000			0,00		0,00065		0,00		0,00000		0,00		0,00000		0,00		0,00000		0,00		0,00000		0,00														
Black Carbon Emissions (ton/ton fuel)	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,000	0,0096	0,0096	0,0000	0,0096	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,000	0,000															
Dinitrogen Monoxide N2O (ton/ton fuel)	0,0028	0,0028	0,0000	0,0019	0,001	0,000	0,0007	0,0000	0,0000	0,0003	0,000	0,000	0,1233	0,1233	0,0000	0,0369	0,000	0,000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0001	0,000	0,000	0,0090	0,0000	0,0000	0,0003	0,000	0,000															
Methane CH4 (ton/ton fuel)	0,0187	0,0187	0,0000	0,0128	0,000	0,000	0,0647	0,0000	0,0000	0,0016	0,000	0,000	0,0096	0,0096	0,0000	0,2818	0,000	0,000	0,0016	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,000	0,0405	0,0000	0,0000	0,0152	0,000	0,000															
Carbon Dioxide CO2 (ton/ton fuel)	34,7914	34,7914	0,0000	23,4618	16,9658	0	8,7120	0,0000	0,0000	3,3015	0	0	1541,83	1541,83	0,0000	486,3917	0	0	0,0096	0,0000	0,0000	1,8333	0	0	78,2717	78,2717	0,0000	28,3314	0	8,26792128															
Black Carbon Emissions (ton/ton fuel)		0,0003			0,0002		0,0000			0,0169		0,0000				0,0169				0,0000								0,0004		0,0000															
Dinitrogen Monoxide N2O (ton/ton fuel)		0,0074			0,0069		0,0010			0,2856		0,0004				0,2856				0,0004								0,0663		0,0000															
Methane CH4 (ton/ton fuel)		0,0501			0,0003		0,0095			1,9210		0,0026				1,9210				0,0026								0,0566		0,0000															
Carbon Dioxide CO2 (ton/ton fuel)		83,04			16,9658		12,01			3963,46		4,57				3963,46				4,57								103,60		8,2679															
KWh/Kwh	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	1246,0541	0	0	474,38			162,39	162,39	0	196,43				617,06	617,06	0	316,22	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0														
Kwh/Kwh	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,0178986	0	0	0,01	0	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,01	0,01	0	0,00	0	0	0,00	0	0	0,00	0	0															
KgLNG/Kwh	0,013	0,013	0,0000	0,008	0,00	0	0,007	0	0	0,009	0	0	0,013	0,013	0,0000	0,007	0	0	0,013	0,013	0	0,013	0	0	0,007	0	0	0,009	0	0															
ΣΥΝΟΛΙΚΑ KgLNG/Pwh	0,14																																												
ΣΥΝΟΛΙΚΑ (Kwh/tonnet)	0,06																																												
ΣΥΝΟΛΙΚΑ Kwh/Kton	3782,62																																												
LNG Black Carbon Emissions (ton/ton fuel)	0,00																																												
LNG Dinitrogen Monoxide N2O (ton/ton fuel)	0,08																																												
LNG Methane CH4 (ton/ton fuel)	0,42																																												
LNG Carbon Dioxide CO2 (ton/ton fuel)	780,48																																												
MGO Black Carbon Emissions (ton/ton fuel)	0,00																																												
MGO Dinitrogen Monoxide N2O (ton/ton fuel)	0,00																																												
MGO Methane CH4 (ton/ton fuel)	0,00																																												
MGO Carbon Dioxide CO2 (ton/ton fuel)	24,26																																												
ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ GAS (MT)	639,20																																												
ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ GAS (M3)	1439,64																																												
ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ MGO (MT)	7,57																																												

Fuel	Black Carbon	Dinitrogen Oxide (NOx)	Methane	Carbon Dioxide
LNG	0,00001	0,00022	0,00148	2,750
MGO	0,00004	0,00018	0,00006	3,206

**9**

***Παράρτημα ΙΙ: Υπολογισμοί με SIMA PRO 7.2 των 4 case studies***



Case No1 - Bulk Carrier

SimaPro 7.2 Impact assessment Date: 30/05/2022 Time: 22:36  
 Project Diplon-Korfiatis

Title: **Analysing 1 p 'Case No1 bulker (TOTAL)'**  
 Method: EPD (2008) V1.03  
 Indicator: Characterisation  
 Skip categories: Never  
 Relative mode: None  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No

Impact category	Unit	Total	Light fuel oil, at regional storage/RER U	Heavy fuel oil, at regional storage,RER U	Case 1 - Port loading (MGO)	Case 1 - Maneuvering Departure (MGO)	Case 1 - Cruising (MGO)	Case 1 - Cruising (VLSFO)	Case 1 - Maneuvering Arrival (VLSFO)	Case 1 - Port discharging (MGO)
Global warming (GWP100)	ton CO2 eq	1094,389	72,61990308	219,311167	0,493623167	0	20,972544	772,697531	0	8,29440194
Ozone layer depletion (ODP)	ton CFC-11 eq	0,000253	5,82371E-05	0,00019452	0	0	0	0	0	0
Photochemical oxidation	ton C2H4 eq	0,946486	0,219936156	0,72846104	5,44821E-08	0	2,4061E-06	8,4937E-05	0	1,2105E-06
Acidification	ton SO2 eq	3,116409	0,749111789	2,3672971	0	0	0	0	0	0
Eutrophication	ton PO4--- eq	0,555551	0,128452289	0,42330575	3,54134E-06	0	0,00014597	0,00558439	0	5,901E-05
Non renewable, fossil	TJ eq	33,84704	7,794233655	26,0528037	0	0	0	0	0	0

Case No2 - Bulk Carrier

SimaPro 7.2 Impact assessment Date: 30/05/2022 Time: 22:47  
 Project Diplom-Korfiatis

Title: **Analysing 1 p 'Case No2 bulker (TOTAL)'**  
 Method: EPD (2008) V1.03  
 Indicator: Characterisation  
 Skip categories: Never  
 Relative mode: None  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No

Impact category	Unit	Total	Light fuel oil, at regional storage/RER U	Heavy fuel oil, at regional storage/RER U	Case 2 - anchorage in Turkey (MGO)	Case 2 - Cruising (VLSFO)	Case 2 - Cruising under pilotage in Voposna (VLSFO)	Case 2 - discharging (VLSFO)	Case 2 - loading (VLSFO)	Case 2 - manoeuvring arrival (VLSFO)	Case 2 - manoeuvring departure (VLSFO)
Global warming (GWP100)	ton CO2 eq	1376,37	1,347986007	287,5286031	0,01110592	1078,52354	0,001498537	8,85657983	0,098937	0,0005438	0,0015559
Ozone layer depletion (ODP)	ton CFC-11 eq	0,000258	1,08101E-06	0,000255021	0	0	0	0	0	0	0
Photochemical oxidation	ton CH4 eq	0,958627	0,004062501	0,952429052	3,2004E-09	0,000114637	0	9,72073E-07	5,34E-08	0	4,164E-10
Acidification	ton SO2 eq	3,117558	0,013905172	3,103632386	0	0	0	0	0	0	0
Eutrophication	ton PO4--- eq	0,56517	0,002347234	0,55497635	3,4671E-08	0,007781597	0	6,3864E-05	1,16E-06	5,317E-09	9,022E-09
Non renewable, fossil	TJ eq	34,30129	0,144678214	34,15661112	0	0	0	0	0	0	0

Case No3 - LNG Carrier

Simapro 7 Impact assessment Project: Delom-Korfats Date: 30/05/2022 Time: 22:40

Title: Analysing 1 p 'Case No3 LNG Carrier (TOTAL)'  
 Method: EPD (2008) V1.03  
 Indicator: Characterisation  
 Skip rates: Never  
 Relative to: None  
 Exclude to: No  
 Exclude to: No

Impact category	Unit	Total	Light fuel oil, at regional storage	Natural gas, liquefied, at freight	Case 3 - Cruising (LHG)	Case 3 - Manoeuvring Arrival (LNG)	Case 3 - Manoeuvring Departure (LNG)	Case 3 - Portage in Suez Canal (LHG)	Case 3 - Port discharging (LHG)	Case 3 - Port discharging (MGO)	Case 3 - Port loading (LHG)	Case 3 - Port loading (MGO)	Methane leakage
Global w.e. ton CO2 eq		1012.25	0.721485410	278.2714926	3221.17112	0.02199388	0.05421878	1.530485976	4.003133958	0.11205932	4.5335902	0.0960214	85.67
Ozone lay. ton CFC-11 eq		5.82E-09	4.58831E-09	1.23208E-09	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Photochem. ton C2H4 eq		0.162856	0.017326593	0.148647319	0.00390463	8.8142E-08	1.7004E-07	4.76261E-06	1.89667E-05	1.4112E-08	1.4121E-05	9.792E-09	0.02574
Acidificat. ton SO2 eq		0.238829	0.059200776	0.178692053	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eutroph. ton PO4--- eq		0.08405	0.00992762	0.061574953	0.0124081	1.4404E-07	5.968E-07	1.53499E-05	4.00459E-05	8.4084E-07	4.5634E-05	7.072E-07	0
Non renew. TJ eq		27.59972	0.61406229	26.9620399	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Case No4 - LNG Carrier

SimaPro 7.2 Impact assessment Date: 30/05/2022 Time: 22:56  
 Project: Diplom-Korfaits  
 Title: Analysis 1 in Case No4 LNG Carrier (TOTAL)  
 Method: EPD (2008) V1.03  
 Indicator: Characterisation  
 Skip categories: Never  
 Relative mode: None  
 Exclude infrastructure processes: No  
 Exclude long-term emissions: No

Impact category	Unit	Total	Light fuel oil, at regional storage/ER U	Natural gas, liquefied, at liquefaction plant/DZ U	Case 4 - Cruising (LNG)	Case 4 - Maneuvering Departure (LNG)-DG	Case 4 - Maneuvering Arrival (LNG)-DG	Case 4 - Port discharging (MGO)-DG	Case 4 - Port loading (LNG)-DG	Case 4 - Port loading (MGO)-DG	Case 4 - Port discharging (LNG)-DG	Methane leakage
Global warming (GWP100)	ton CO2 eq	2617,226475	3.62117016	365,9068511	2073,040512	0,054430535	0,013140143	0,0214452	3,20002674	0,08084183	4,043505334	146,97
Ozone layer depletion (ODP)	ton OFC-11 eq	4,77041E-06	3,06833E-06	1,70207E-06	0	0	0	0	0	0	0	0
Photochemical oxidation	ton CH4 eq	0,269271046	0,011587753	0,212850277	0,006461015	1,7043E-07	4,155E-08	0	1,0169E-05	8,064E-06	1,28119E-05	0,03834
Acidification	ton SO2 eq	0,286218019	0,030468372	0,228750548	0	0	0	0	0	0	0	0
Eutrophication	ton PO4-- eq	0,109154641	0,009663377	0,076650307	0,000812472	5,681E-07	1,4404E-07	0	3,2544E-05	5,8309E-07	4,0849E-05	0
Non renewable, fossil	TJ eq	39,79239395	0,410653949	39,38174	0	0	0	0	0	0	0	0