



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία»**

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

**«ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ: ΜΕΛΕΤΗ
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΩΣ
ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΤΟ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ»**

**«DECARBONIZATION OF SHIPPING: A STUDY ON THE
COMPETITIVENESS OF GREEN METHANOL AS A SUBSTITUTE FOR
CONVENTIONAL FUELS»**



ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΟΥ ΜΑΡΙΛΕΝΑ
Α.Μ.: mscna2102

Επιβλέπων Καθηγητής: Αναπλ. Καθηγητής Γεώργιος Λιβανός
Αιγάλεω, 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία»

Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία

«Απανθρακοποίηση της Ναυτιλίας: Μελέτη ανταγωνιστικότητας της Πράσινης Μεθανόλης ως υποκατάστατο των συμβατικών καυσίμων»

Συγγραφέας

Μαριλένα Αποστολίδου (Α.Μ.: mscna2102)

Επιβλέπων

Ονοματεπώνυμο,

Γεώργιος Λιβανός, Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

05/12/2024

Εξεταστική Επιτροπή

Δημήτριος Κουμπογιάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής,
ΠΑ.Δ.Α

Σωτηρία Δημητρέλλου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια,
ΠΑ.Δ.Α

Γεώργιος Λιβανός

Αναπληρωτής Καθηγητής,
ΠΑ.Δ.Α

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη **Αποστολίδου Μαριλένα** του **Σπυρίδωνα**, με αριθμό μητρώου **mscna2102** φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών **Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία** του Τμήματος **Ναυπηγών Μηχανικών** της Σχολής **Μηχανικών** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα

Μαριλένα Αποστολίδου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο, θέλω θερμά να εκφράσω τις ευγνωμοσύνες μου προς ορισμένα αξιαγάπητα πρόσωπα, οι οποίοι συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Καταρχάς, θα ήθελα να εκφράσω την αισθαντική μου ευγνωμοσύνη προς τον εκπληκτικό καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Λιβανό, ο οποίος μου παρείχε την μοναδική ευκαιρία να επικεντρωθώ στο θέμα αυτής της εργασίας. Παράλληλα, δεν μπορώ παρά να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τις εξαιρετικές γνώσεις που μοιράστηκε μαζί μας κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος MSc. στις Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία.

Εξίσου σημαντικό είναι να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τις ανεκτίμητες καθοδηγήσεις που μου παρείχε, βοηθώντας με να ολοκληρώσω την εργασία με επιτυχία. Τέλος, θέλω να αποτίνω έναν ιδιαίτερο φόρο τιμής στους αγαπημένους μου γονείς, τον Σπύρο και τη Βασιλική Αποστολίδου, για την ακατάπαυστη στήριξη και τη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια της σύνταξης αυτής της εργασίας, αλλά και για την αδιάκοπη συντροφιά τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο πρόγραμμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην εις βάθος ανάλυση της πράσινης μεθανόλης ως βιώσιμου καυσίμου στη ναυτιλία, εστιάζοντας στις περιβαλλοντικές, τεχνικές αλλά και οικονομικές πτυχές της χρήσης της. Η εργασία είναι δομημένη σε δύο κύρια μέρη: το θεωρητικό και τη περιπτωσιολογική μελέτη.

Στο θεωρητικό μέρος, η εργασία ξεκινά με την παρουσίαση του νομοθετικού πλαισίου που ρυθμίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) στον τομέα της ναυτιλίας. Εξετάζεται η στρατηγική του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) καθώς και οι πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εστιάζοντας στους νέους κανονισμούς που έχουν τεθεί σε εφαρμογή για την περίοδο 2023-2030, όπως ο κανονισμός CII (Ship's Carbon Intensity Indicator), ο κανονισμός EU ETS καθώς και ο FuelEU, που προωθούν τη χρήση καθαρών καυσίμων. Η μελέτη περιλαμβάνει επίσης την ανάλυση του ρόλου των εναλλακτικών καυσίμων και των παραγόντων που επηρεάζουν την αξιολόγηση και χρήση τους στην ναυτιλία.

Στο μέρος της περιπτωσιολογικής μελέτης, η εργασία εστιάζει στη χρήση της πράσινης μεθανόλης σε πλοία, αναλύοντας τις ρυθμιστικές υποχρεώσεις και τις κατευθυντήριες γραμμές που διέπουν τη χρήση της ως θαλάσσιο καύσιμο. Εξετάζονται οι διαδικασίες τροφοδοσίας μεθανόλης στα συστήματα πρόωσης των πλοίων, οι απαιτήσεις αποθήκευσης και μεταφοράς, καθώς και οι τεχνικές προδιαγραφές που είναι απαραίτητες για την ασφαλή και αποδοτική χρήση της.

Η εργασία αποκτά πρόσθετη διάσταση με τη σύγκριση της μεθανόλης και πιο συγκεκριμένα της πράσινης μεθανόλης με άλλες υφιστάμενες λύσεις όπως είναι το βαρύ πετρέλαιο χαμηλού θείου (VLSFO & MGO). Πραγματοποιείται ανάλυση των οικονομικών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων των τιμών και της διαθεσιμότητας των καυσίμων, καθώς και η επίδραση τους στο συνολικό κόστος λειτουργίας των πλοίων. Επιπλέον, αξιολογούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεθανόλης, εστιάζοντας στο μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα και τις δυνατότητές της για συμβολή στη βιωσιμότητα της ναυτιλίας. Μέσα από την ανάλυση προκύπτουν και άλλα συμπεράσματα τόσο για τον οικονομικό όσο και τον περιβαλλοντικό παράγοντα καταλήγοντας στο ότι η πράσινη μεθανόλη μπορεί να αποτελέσει μια λύση για το μέλλον ως καύσιμο για τη ναυτιλία.

Συνολικά, η εργασία συνεισφέρει στην κατανόηση των προοπτικών της μεθανόλης ως βιώσιμου καυσίμου στον ναυτιλιακό τομέα, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των πλεονεκτημάτων, των προκλήσεων και των ευκαιριών που τη συνοδεύουν. Η ανάλυση με τη χρήση ενός παραδείγματος (πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων) εκτιμά τη συμβολή της μεθανόλης στη μείωση των εκπομπών και την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, προτείνοντας στρατηγικές για την υιοθέτησή της σε ευρύτερη κλίμακα.

Λέξεις κλειδιά: Απανθράκωση, Ναυτιλία, Μεθανόλη, Πράσινη Μεθανόλη, Πράσινα Καύσιμα, Ανταγωνιστικότητα, Περιβαλλοντική αειφορία, Υποκατάστατα καυσίμων, Βιωσιμότητα, Κλιματική αλλαγή, Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, Εναλλακτικές ενεργειακές πηγές, Κανονισμοί, IMO

ABSTRACT

This thesis aims to conduct an in-depth analysis of methanol as a sustainable fuel in shipping, focusing on the environmental, technical, and economic aspects of its use. The work is structured into two main parts: the theoretical and the case study.

In the theoretical part, the thesis begins by presenting the legislative framework regulating greenhouse gas (GHG) emissions in the shipping sector. It examines the strategy of the International Maritime Organization (IMO) as well as the policies of the European Union, focusing on the new regulations implemented for the period 2023-2030, such as the CII (Ship's Carbon Intensity Indicator), the EU ETS, and FuelEU, which promote the use of clean fuels. The study also includes an analysis of the role of alternative fuels and the factors influencing their assessment and use in shipping.

In the case study, the thesis focuses on the use of methanol in ships, analysing the regulatory obligations and guidelines governing its use as a marine fuel. It explores the procedures for supplying methanol to ship propulsion systems, the requirements for storage and transportation, as well as the technical specifications needed for its safe and efficient use.

The thesis gains additional depth by comparing methanol, specifically green methanol, with other ecological alternatives that are being used nowadays in the shipping industry such as marine Diesel Oil and the Very Low Sulphur Fuel Oil (VLSFO and MGO). An analysis of the economic factors is conducted, including the prices and availability of fuels, as well as their impact on the overall operating costs of ships. Furthermore, the environmental impacts of methanol are assessed, focusing on its reduced carbon footprint and its potential contribution to the sustainability of shipping. Also from the case study many other results occur that have to do with both the economical and the environmental sector which results that the green methanol can be a future fuel for the shipping industry.

Overall, the thesis contributes to the understanding of the prospects of methanol as a sustainable fuel in the maritime sector, providing a comprehensive overview of the advantages, challenges, and opportunities it presents. The analysis, by a case study (a container ship), estimates methanol's contribution to emissions reduction and the protection of the marine environment, proposing strategies for its broader adoption.

Key Words: Decarbonization, Shipping, Methanol, Green methanol, Sustainable fuels, Competitiveness, Environmental sustainability, Fuel substitutes, Sustainability, Climate change, Greenhouse gas emissions reduction, Alternative Energy sources, Regulations, IMO

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|----|
| ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ | 3 |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 4 |
| ABSTRACT | 6 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ | 10 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ – ΣΧΗΜΑΤΩΝ | 10 |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ | 12 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 14 |
| ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ | 18 |
| Κεφάλαιο 1ο: ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ | 18 |
| 1.1. ΑΡΧΙΚΟ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ | 21 |
| 1.2 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΟΥ ΙΜΟ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΕ ΓΙΑ ΤΑ GHGs .. | 26 |
| 1.3 ΑΛΛΟΙ ΝΕΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ 2023-2030 | 32 |
| 1.3.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΕΕΧΙ (Energy Efficiency Index for Existing Ships) | 33 |
| 1.3.2 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ CII (Ship’s Carbon Intensity Indicator) | 35 |
| 1.3.3 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ FuelEU | 38 |
| 1.5 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ | 45 |
| 1.5.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ | 45 |
| Κεφάλαιο 2ο: ΜΕΘΑΝΟΛΗ & ΠΡΑΣΙΝΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗ | 51 |
| 2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΚΑΤΗΡΙΣΤΙΚΑ & ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ | 51 |
| 2.2. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗ | 56 |
| 2.3 ΠΡΑΣΙΝΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ | 58 |
| | 65 |
| 2.4 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ | 65 |
| ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 71 |
| Κεφάλαιο 3ο: ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΕΝΑ ΠΛΟΙΟ | 71 |
| 3.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ/ΟΔΗΓΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΑΝΟΛΗ ΩΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΑΥΣΙΜΟ | 71 |
| 3.2 ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ | 72 |
| 3.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ & ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΟΙΟΥ | 73 |
| Κεφάλαιο 4ο: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΣΕ ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ | 80 |
| ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟ ΑΡΓΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ | 80 |
| 4.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ - ΤΙΜΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ | 81 |
| 4.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ | 86 |

| | |
|--|------------|
| 4.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ | 88 |
| 4.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ..... | 94 |
| 4.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΜΕ ΚΑΥΣΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ..... | 109 |
| 4.3.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ..... | 119 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 139 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 144 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

| | |
|---|-----|
| Διάγραμμα 1: Εφαρμογή του EEDI..... | 23 |
| Διάγραμμα 2: SEEMP Πλάνο..... | 25 |
| Διάγραμμα 3: Sulphur Cap 2020 | 28 |
| Διάγραμμα 4: Fit for 55 | 29 |
| Διάγραμμα 5: EU ETS Implementation | 31 |
| Διάγραμμα 6: Χρονική Εφαρμογή του EU ETS μέχρι το 2025 | 32 |
| Διάγραμμα 7: Χρονική Εφαρμογή του EEXI..... | 33 |
| Διάγραμμα 8: Ποσοστά μείωσης των CO ₂ -ισοδύναμου ανά μεγατζούλ (MJ) στο πέρασμα των χρόνων | 38 |
| Διάγραμμα 9: Κατηγοριοποίηση Εναλλακτικών Καυσίμων | 46 |
| Διάγραμμα 10: Παραγωγή Συμβατικής μεθανόλης (καφέ ή γκρι) | 53 |
| Διάγραμμα 11: Παραγωγή διαφόρων ειδών Μεθανόλης | 58 |
| Διάγραμμα 12: Παραγωγή bio-methanol..... | 61 |
| Διάγραμμα 13: Παραγωγή μεθανόλης από συνδυασμό βιομάζας και ηλεκτρόλυση .. | 62 |
| Διάγραμμα 14: Παραγωγή Πράσινης μεθανόλης μέχρι το 2023 (α)..... | 65 |
| Διάγραμμα 15: Παραγωγή Πράσινης Μεθανόλης μέχρι το 2023 (β)..... | 65 |
| Διάγραμμα 16: Αλυσίδα παραγωγής της μεθανόλης..... | 66 |
| Διάγραμμα 17: Κύκλος Ζωής Διαφόρων Καυσίμων..... | 68 |
| Διάγραμμα 18: Κύκλος ζωής της Πράσινης Μεθανόλης | 68 |
| Διάγραμμα 19: Διάγραμμα Τροφοδοσίας πλοίου με μεθανόλη | 72 |
| Διάγραμμα 20: Περίπτωση A – 10bar πίεση | 78 |
| Διάγραμμα 21: Περίπτωση B - 400bar πίεση | 78 |
| Διάγραμμα 22: Απεικόνιση εφαρμογής της μεθανόλης στους τύπους πλοίων | 81 |
| Διάγραμμα 23: Διακύμανση τιμών Μεθανόλης (Methanol Institute)..... | 82 |
| Διάγραμμα 24: Εξέλιξη τιμής μεθανόλης στη διάρκεια του χρόνου..... | 83 |
| Διάγραμμα 25: Τιμή μεθανόλης σε διαφορετικούς θαλάσσιους δρόμους και αγορές | 84 |
| Διάγραμμα 26: Αξιολόγηση Πράσινης Μεθανόλης και Πετρελαίου ως μελλοντικό καύσιμο | 134 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ – ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Διαχωρισμός Αέριων Ρύπων | 18 |
| Εικόνα 2: Μεταβολές στα επίπεδα εκπομπών από το 1990 μέχρι το 2030 | 20 |
| Εικόνα 3: Συντελεστές μείωσης EEDI στο πέρασμα του χρόνου | 24 |
| Εικόνα 4: dd όρια για το διαχωρισμό των ορίων του CII..... | 37 |
| Εικόνα 5: FuelEU Maritime υπολογισμός ενέργειας..... | 39 |
| Εικόνα 6: Παράδειγμα Pooling 2 πλοίων (ένα συμβατικό & ένα Αμμωνίας) | 41 |
| Εικόνα 7: Χρονοδιάγραμμα εναλλακτικών Καυσίμων..... | 47 |
| Εικόνα 8: Βιο-Μεθανόλη & e-μεθανόλη | 63 |
| Εικόνα 9: Έργα πράσινης Μεθανόλης μέχρι το 2027..... | 70 |
| Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική συστήματος μεθανόλης σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων | 73 |
| Εικόνα 11: Χάρτης πορτοκαλί και πράσινης μεθανόλης..... | 85 |
| Εικόνα 12: Τοξικότητα μεθανόλης για τους θαλάσσιους οργανισμούς | 86 |
| Εικόνα 13: Αποτύπωση του κυκλικού ταξιδιού – Θαλάσσιες διαδρομές - Πηγή: (Netpas, 2024)..... | 91 |
| Εικόνα 14: Παράετροι για τον υπολογισμό του CII Reference | 96 |
| Εικόνα 15: Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 16: Πίνακας σταθερών για τον υπολογισμό της βαθμολογίας του πλοίου αναφορικά με το CII | 98 |
| Εικόνα 17: Μεταβολή του δείκτη (βαθμολογία) στη πάροδο των ετών..... | 99 |
| Εικόνα 18: Βαθμολογία πλοίου αναφορικά με το δείκτη με χρήση της μεθανόλης. 111 | |
| Εικόνα 19: Αξιολόγηση Πράσινης Μεθανόλης και Πετρελαίου 2..... | 136 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση Μεθανόλης | 52 |
| Πίνακας 2: Ρύποι Μεθανόλης σε επίπεδο WtT | 67 |
| Πίνακας 3: Πίνακας παράθεσης στοιχείων εμπορικών ταξιδιών πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων | 90 |
| Πίνακας 4: Συνδυασμοί Ταχύτητας και Κατανάλωσης ορισμένου πλοίου..... | 92 |
| Πίνακας 5: Καταναλώσεις ανά ταξίδι και σε λιμάνι για το πλοίο μελέτης..... | 93 |
| Πίνακας 6: Πίνακας αναλογίας καυσίμου ανά ναυτικό μίλι | 94 |
| Πίνακας 7: Συγκεντρωτικό Πίνακας για τον κανονισμό του CII | 100 |
| Πίνακας 8: Πίνακας καταναλώσεων για το EU ETS..... | 102 |
| Πίνακας 9: Πίνακας εκπομπών CO ₂ | 102 |
| Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός Πίνακας για τον κανονισμό EU ETS (2024-2026) .. | 103 |
| Πίνακας 11: Πίνακας Καταναλώσεων σε Ευρωπαϊκά Ταξίδια | 105 |
| Πίνακας 12: Πίνακας Αποτελεσμάτων για τον κανονισμό του Fuel EU | 108 |
| Πίνακας 13: Πίνακας αρχικών καταναλώσεων για το πρώτο κυκλικό ταξίδι..... | 112 |
| Πίνακας 14: Πίνακας καταναλώσεων Μεθανόλης και Πιλοτικού καυσίμου..... | 113 |
| Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας εκπομπών CO ₂ για το πρώτο κυκλικό ταξίδι | 114 |
| Πίνακας 16: Πίνακας EU ETS 2024, 2025, 2026 με χρήση Μεθανόλης..... | 115 |
| Πίνακας 17: Πίνακας Αποτελεσμάτων για τον κανονισμό του Fuel EU με χρήση e-methanol..... | 119 |
| Πίνακας 18: Αποτύπωση σεναρίων μελέτης για την εξέλιξη του κόστους το 2050. 132 | |

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

| |
|--|
| ΔΝΟ: Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός |
| ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση |
| ΙΜΟ: International Maritime Organization |
| ΕΕΧΙ: Energy Efficiency Indicator for Existing Ships |
| ΕΡΛ: Engine Power Limitation (Περιορισμός Ισχύς στον Κινητήρα) |
| ShaPoLi: Shaft Power Limitation (Περιορισμός Ισχύς στον Άξονα) |
| СΙΙ: Carbon Intensity Indicator |
| ΕΕΟΙ: Energy Efficiency Operations Index |
| ΔΒΤ: Deadweight Tonnage |
| CO ₂ : Διοξείδιο του Άνθρακα |
| SO _x : Οξειδία του Θείου |
| NO _x : Οξειδία του Αζώτου |
| H ₂ O: Υδρατμοί |
| CH ₄ : Μεθάνιο |
| CH ₄ O: Μεθανόλη |
| N ₂ O: Υποξείδιο του αζώτου |
| CFCs: Χλωροφθοράνθρακες |
| O ₃ : Τροποσφαιρικό όζον |
| PM: Particular Matters |
| MEPC: Επιτροπή Προστασίας Θαλασσίου περιβάλλοντος |
| SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan |
| ΕΕΟΙ: Energy Efficiency Operating Index |
| MRV: Monitoring, Reporting & Verification |
| ECA: Emission Control Areas |

| |
|---|
| AFID: Alternative Fuels Infrastructure Regulation |
| ETD: Energy Taxation Directive |
| ΣΕΔΕ: Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (για την Ευρωπαϊκή Ένωση) |
| EU ETS: European Union – European Trading System |
| ΣΕΔΕ: Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών |
| MBMs: Αγορα-κεντρικά μέτρα (Market Based Measures) |
| RFNBO: Renewable Fuels of Non-Biological Origin. |
| OPS: Onshore power supply |
| OECD: Organization for Economic Cooperation and Development |
| WTT: Well-to-tank |
| TTW: Tank-to-wake |
| NH3: Συμβολισμό Αμμωνίας |
| EGR: Exhaust gas recirculation system |
| SCR: Selective catalytic reduction system |
| MCR: Maximum Continuous Rating (μέγιστη ιπποδύναμη πλοίου) |
| NCR: Normal Continuous Rating (Κανονική/Συνήθης ιπποδύναμη πλοίου) |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Απανθρακοποίηση στη ναυτιλία αναφέρεται στη μείωση των εκπομπών άνθρακα που παράγονται από τα πλοία στη βιομηχανία των μεταφορών. Η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι υπεύθυνη για ένα σημαντικό μέρος των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα, καθιστώντας την έναν κρίσιμο τομέα για την επίτευξη των κλιματικών στόχων. Στο πλαίσιο αυτό ο IMO (Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός) δεν είναι αμέτοχος, αλλά ήδη εδώ και πολλά χρόνια έχει συμβάλλει θέτοντας στόχους για τη μείωση των ρύπων από τα πλοία αλλά και την γενικότερη βελτίωση της εικόνας της ναυτιλίας απέναντι στο μεγάλο πρόβλημα και παράλληλα την ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος. Από την πλευράς της, η απαλλαγή από τον άνθρακα στην ναυτιλία περιλαμβάνει τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη μετάβαση σε καθαρότερα καύσιμα, όπως η αμμωνία, το υδρογόνο και τα βιοκαύσιμα.

Επιπλέον, η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιμετωπίζει αυξημένη πίεση για απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές λόγω παγκόσμιων συμφωνιών όπως τη Συμφωνία του Παρισιού, η οποία στοχεύει να περιορίσει την αύξηση των παγκόσμιων θερμοκρασιών σε πολύ κάτω από τους 2°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα. Η απαλλαγή της ναυτιλίας από τον άνθρακα είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών, οι οποίοι στοχεύουν στη διασφάλιση βιώσιμης οικονομικής ανάπτυξης. Η μετάβαση σε καθαρότερα καύσιμα και η χρήση τεχνολογίας για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης θα διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας και στην επίτευξη αυτών των παγκόσμιων στόχων.

Στο πλαίσιο αυτό, η μετάβαση στην απαλλαγή από τον άνθρακα στη ναυτιλία θα απαιτήσει σημαντικές επενδύσεις και συνεργασία μεταξύ των κυβερνήσεων, της βιομηχανίας και άλλων ενδιαφερόμενων μερών και φορέων. Οι κυβερνήσεις μπορούν να παράσχουν κίνητρα στις ναυτιλιακές εταιρείες για μετάβαση σε καθαρότερα καύσιμα, ενώ η βιομηχανία μπορεί να επενδύσει στην έρευνα και την ανάπτυξη για την εξεύρεση καινοτόμων λύσεων για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Θα είναι επίσης απαραίτητη η συνεργασία μεταξύ του δημόσιου και του ιδιωτικού τομέα για να διασφαλιστεί η ευρεία υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και βέλτιστων πρακτικών που υποστηρίζουν την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές. Με τη συνεργασία, η

ναυτιλιακή βιομηχανία μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα αλλά και στην γενικότερη προστασία του πλανήτη για τις μελλοντικές γενιές.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO), προκειμένου να «πιέσει» τις ναυτιλιακές εταιρίες να συμμορφωθούν και να συμβάλλουν με τα πλοία τους στην μείωση των αέριων εκπομπών θερμοκηπίου θέτει από το 2023 σε εφαρμογή δύο νέους κανονισμούς, έναν τεχνικό και έναν λειτουργικό. Αυτοί είναι το Energy Efficiency Indicator for Existing Ships (EEXI) που πρόκειται για τεχνικό δείκτη και ο άλλος είναι ο Carbon Intensity Indicator (CII) που είναι λειτουργικός και υπολογίζεται σε ετήσια βάση για κάθε πλοίο από τις ναυτιλιακές εταιρίες. Ο δείκτης έντασης άνθρακα ή αλλιώς CII, είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των εκπομπών άνθρακα που παράγονται από τα πλοία. Εκφράζεται ως η ποσότητα των εκπομπών CO₂ (σε γραμμάρια) που παράγονται ανά μονάδα νεκρού φορτίου (που μεταφέρεται ανά ναυτικό μίλι). Το CII χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της απόδοσης άνθρακα διαφορετικών κατηγοριών πλοίων και ναυτιλιακών εταιρειών και για την παρακολούθηση της προόδου της ναυτιλιακής βιομηχανίας προς τους στόχους της απαλλαγής από τον άνθρακα. Το CII είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τη μέτρηση του αποτυπώματος άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας, καθώς παρέχει έναν σαφή και απλό τρόπο σύγκρισης των εκπομπών διαφορετικών πλοίων και εντοπισμού περιοχών προς βελτίωση. Ο δείκτης αυτός ήρθε να αντικαταστήσει τον Energy Efficiency Operations Index (EEOI) αξιολογώντας τα πλοία με λίγο πιο δίκαιο τρόπο μιας και πλέον δεν λαμβάνεται υπόψη το φορτίο που μεταφέρει το κάθε πλοίο και η ποσότητά του αλλά το μόνο βάρος του κελύφους του πλοίου (DWT) το οποίο είναι σταθερό, κατηγοριοποιώντας τα πλοία με βάση αυτό. Άρα ανεξάρτητα από την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου, γίνεται αξιολόγηση αυτών με παραμέτρους τις αέριες εκπομπές (CO₂ emissions), την κατανάλωση και την απόσταση που διανύεται.

Το CII χρησιμοποιείται από πλοιοκτήτες, χειριστές και ρυθμιστικές αρχές για την αξιολόγηση της απόδοσης άνθρακα των πλοίων και για τον εντοπισμό ευκαιριών μείωσης των εκπομπών. Οι ναυτιλιακές εταιρίες και οι κυβερνήσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν το CII για να θέσουν στόχους μείωσης των εκπομπών και να παρακολουθήσουν την πρόοδο προς αυτούς τους στόχους με την πάροδο του χρόνου. Το CII χρησιμοποιείται επίσης για την ενημέρωση των πολιτικών αποφάσεων που

σχετίζονται με την απαλλαγή από τον άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας και για την ενθάρρυνση των επενδύσεων σε νέες τεχνολογίες και καθαρά καύσιμα.

Συμπερασματικά, ο δείκτης αυτός είναι ένα κρίσιμο εργαλείο για τη μέτρηση του αποτυπώματος άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας και την παρακολούθηση της προόδου προς τους στόχους απαλλαγής από τον άνθρακα. Η χρήση του CII μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και καθαρότερων καυσίμων και να ενθαρρύνει τη ναυτιλιακή βιομηχανία να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα και να παίξει ρόλο στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα γίνει αναφορά στο πολιτικό και νομοθετικό κυρίως πλαίσιο του IMO αναφορικά με αυτούς τους κανονισμούς καθώς επίσης και στον τρόπο εφαρμογής τους. Παράλληλα κάνοντας αναφορά στο σχέδιο απανθρακοποίησης του IMO και τους στόχους για τα επόμενα χρόνια, θα γίνει συγκεκριμένη αναφορά στα εναλλακτικά καύσιμα ως μέθοδος βελτίωσης του ανθρακικού αποτυπώματος και πιο εκτενής αναφορά στην Μεθανόλη/Πράσινη Μεθανόλη ως καύσιμο για τα πλοία.

Η πράσινη μεθανόλη είναι ένας τύπος βιοκαυσίμου (καύσιμο με μηδενικού ή σχεδόν μηδενικού ανθρακικού αποτυπώματος) που χρησιμοποιείται ή δύναται να χρησιμοποιηθεί ως ναυτιλιακό καύσιμο για τη μείωση των εκπομπών άνθρακα που παράγονται από τα πλοία. Η μεθανόλη είναι ένα καύσιμο καθαρής καύσης που μπορεί να παραχθεί από μια ποικιλία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης και της βιομάζας, των απορριμμάτων, ακόμη και του διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται από την ατμόσφαιρα. Όταν παράγεται από αυτές τις ανανεώσιμες πηγές, είναι γνωστή ως πράσινη μεθανόλη. Η πράσινη μεθανόλη έχει πολλά πλεονεκτήματα ως ναυτιλιακό καύσιμο τα οποία θα αναλυθούν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής, όπως το ότι είναι ένα καύσιμο ανάμειξης (drop in fuel), που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπάρχοντες κινητήρες και υποδομές με ελάχιστες τροποποιήσεις. Έχει επίσης χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, η οποία μειώνει τις εκπομπές επιβλαβών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως τα οξείδια του θείου (SO_x) και τα σωματίδια. Επιπλέον, η μεθανόλη είναι ένα υγρό καύσιμο που αποθηκεύεται και μεταφέρεται εύκολα, καθιστώντας την μια βολική πηγή καυσίμου για τα πλοία.

Η χρήση της πράσινης μεθανόλης ως θαλάσσιου καυσίμου βρίσκεται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης. Επί του παρόντος, υπάρχει μόνο ένας περιορισμένος

αριθμός πλοίων που χρησιμοποιούν πράσινη μεθανόλη, αλλά ο αριθμός αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ζήτηση για ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Έτσι, στο τελευταίο μέρος της εργασίας μου θα παρουσιαστεί ένα case study με εφαρμογή, ως επιλογή, της μεθανόλης σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συγκριτικά με άλλα καύσιμα. Η μελέτη αυτή θα είναι τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική ταυτόχρονα.

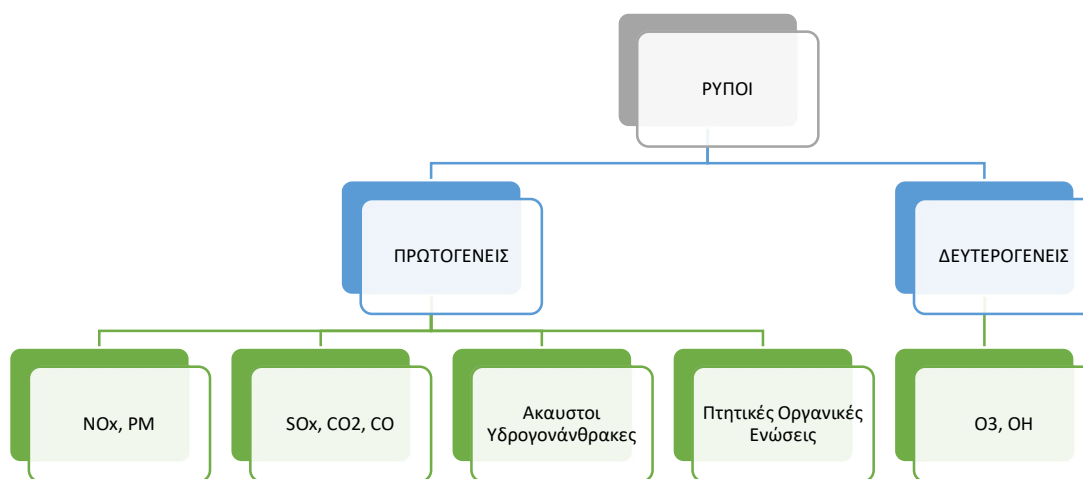
ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

Κεφάλαιο 1ο: ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΣΙΟ

Οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από τα πλοία αποτελούν έναν από τους βασικούς πυλώνες της συνολικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι ρύποι αυτοί, προέρχονται κυρίως από τα πλοία που χρησιμοποιούν μηχανές ντίζελ αλλά και άλλου είδους βοηθητικές μηχανές. Η εκπεμπόμενη ποσότητα των ρύπων έχει να κάνει με τα χαρακτηριστικά του πλοίου που αφορούν το σχεδιασμό του έτσι ώστε να δέχεται τις λιγότερες δυνατές αντιστάσεις από το νερό και κατά συνέπεια να χρειάζεται λιγότερη ώση. Ακόμη, βασικά στοιχεία που επηρεάζουν την εκπεμπόμενη ποσότητα ρύπων είναι η κατάσταση της μηχανής, ο χρόνος ελιγμών καθώς και ο χρόνος παραμονής του πλοίου εντός του λιμένα.

Οι δύο κύριες κατηγορίες ρύπων είναι οι πρωτογενείς και οι δευτερογενείς ρύποι. Οι πρωτογενείς ρύποι εκπέμπονται απευθείας από τις μηχανές των πλοίων, ενώ οι δευτερογενείς ρύποι προέρχονται από το μετασχηματισμό των πρωτογενών ρύπων που έχουν μεγάλο κύκλο ζωής και μεταφέρονται πολύ μακριά από την πηγή εκπομπής υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων με τα συστατικά του ατμοσφαιρικού αέρα. (Λιάρος Αχιλλέας, 2021). Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει το διαχωρισμό αυτών των ρύπων:

Εικόνα 1: Διαχωρισμός Αέριων Ρύπων



Πηγή: Εμού του ιδίου

Η αλλαγή του κλίματος είναι ένα φαινόμενο που εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς τα τελευταία χρόνια. Στην κλιματική αλλαγή συμβάλλουν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου από πλοία, και οι εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν τη στοιβάδα του όζοντος, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τα επίπεδά του ακόμη περισσότερο. Ένα φαινόμενο στο οποίο οι θαλάσσιες μεταφορές και η ναυτιλία γενικότερα παίζει σημαντικό ρόλο στη διαιώνισή του.

Παράλληλα, τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε ναυτικές μηχανές περιέχουν θείο το οποίο είναι μη επιθυμητό, καθώς κατά την καύση του μετατρέπεται σε διοξείδιο του θείου (SO₂) που είναι όξινο και διαβρωτικό, συμβάλλοντας παράλληλα στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Επίσης, εκτός του θείου, περιέχονται και μικρές ποσότητες υλικών όπως αιωρούμενα στερεά και διαλυτές οργανομεταλλικές ενώσεις, που μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία τέφρας κατά την καύση.

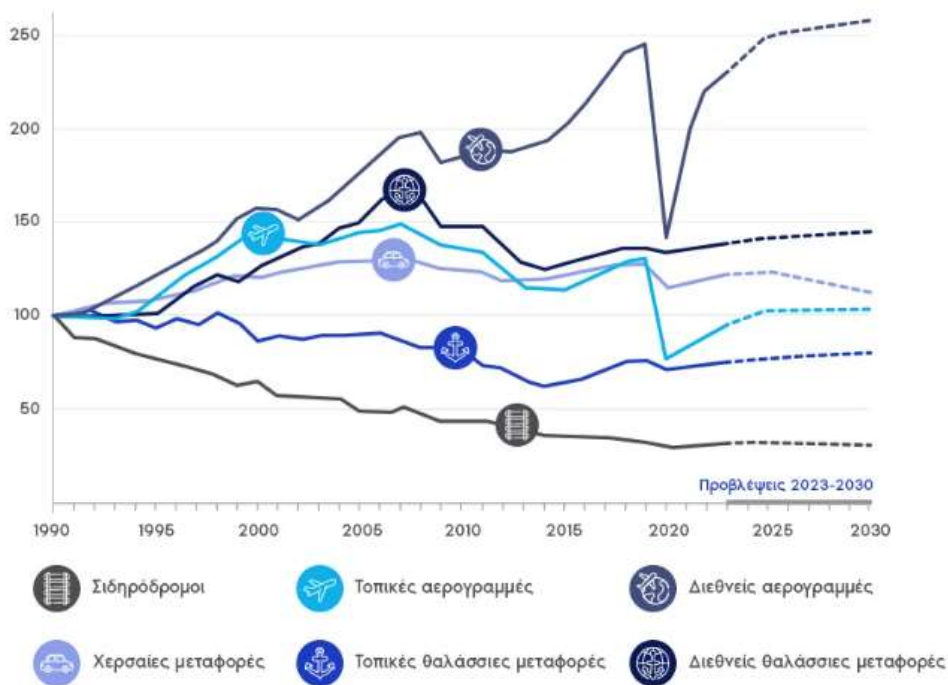
Με συγκεκριμένη αναφορά στα ναυτιλιακά καύσιμα αξίζει να σημειωθεί ότι σε μια ναυτική μηχανή αυτά καίγονται με το οξυγόνο του αέρα και παράγεται η μηχανική ενέργεια που απαιτείται για την κίνηση του πλοίου αποβάλλοντας έτσι θερμική ενέργεια και εκπέμπονται καυσαέρια. Κατά κύριο λόγο τα ναυτιλιακά καύσιμα αποτελούνται από άνθρακα και υδρογόνο (υδρογονάνθρακες πετρελαίου), ενώ η περιεκτικότητα σε άνθρακα του ναυτιλιακού πετρελαίου είναι μεταξύ 84,9% και 87,4%. Το CO₂ δημιουργείται από την τέλεια καύση του άνθρακα των καυσίμων και με αντίστοιχο τρόπο γίνεται η μετατροπή του υδρογόνου των καυσίμων σε υδρατμούς (H₂O). (Χρύσα Μπινιάκου, 2020)

Λαμβάνοντας υπόψη το σημαντικό ποσοστό αύξησης της θαλάσσιας κίνησης, είναι ουσιαστικό να αντιμετωπιστούν οι εκπομπές αερίων από τη ναυτιλία ως ένας μείζον παράγοντας ρύπανσης. Σε συνδυασμό με αυτό τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται από τα πλοία συντελούν αρνητικά στο φαινόμενο αυτό. Η ομάδα του IMO που ασχολείται με την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία συναντήθηκε από το 2000 κιόλας με σκοπό να προσδιορίσει μέτρα τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα για τον περιορισμό των αερίων ρύπων που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα, μιας και πρόκειται για το αέριο που έχει τις μέχρι τώρα μεγαλύτερες επιπτώσεις. (Βλάχος, 2011).

Αναλυτικότερα, αντιπροσωπεύοντας η Ναυτιλία το περισσότερο από το 90% των διεθνών μεταφορών αξίζει να αναφερθεί ότι το μερίδιό της στις παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι κοντά στο 2% με το 2009 να αγγίζει το 2.8%. Από πρώτης άποψης θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι το πλοίο είναι ένα ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον μέσο μεταφοράς δεδομένου ότι το ποσοστό των ρύπων του θερμοκηπίου είναι πολύ μικρό σε αντίθεση με άλλα μεταφορικά μέσα.

Ωστόσο, σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 2015 αν ο κλάδος σε συνδυασμό με αυτόν των αερομεταφορών συνεχίσουν με τους ίδιους ρυθμούς τότε θα μπορούσαν να αυξήσουν μαζί τους αέριους ρύπους κατά 250% μέχρι το 2050. (Μπήλιος, 2018). Η διαπίστωση αυτή έβαλε τον IMO να στοχεύσει σε μέτρα για περιορισμό των αέριων εκπομπών μέχρι το 2023. Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο το πώς έχουν κινηθεί οι ρύποι του διοξειδίου του άνθρακα μέχρι και σήμερα καθώς και μια πρόβλεψη μέχρι το 2030.

Εικόνα 2: Μεταβολές στα επίπεδα εκπομπών από το 1990 μέχρι το 2030



Πηγή: <https://www.alkyonis.co/el/>

Αναφερόμενοι στα αέρια του θερμοκηπίου είναι περίπου 20 και έχουν όγκο μικρότερο από 1% του συνολικού όγκου της ατμόσφαιρας. Τα σημαντικότερα είναι οι υδρατμοί (H₂O), το διοξείδιο του άνθρακα (C O₂), το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και το τροποσφαιρικό όζον (O₃).

μεταβολή στις συγκεντρώσεις αυτών των αερίων, διαταράσσει το ενεργειακό ισοζύγιο, προκαλεί μεταβολή της θερμοκρασίας και ως εκ τούτου κλιματικές αλλαγές. Στην πράξη από τα παραπάνω τα αέρια του θερμοκηπίου που ενδιαφέρουν τη ναυτιλία είναι κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο (CO₂, CH₄) και έχουν αρνητική επίπτωση είτε μόνο στο περιβάλλον είτε τόσο στο περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία.

1.1. ΑΡΧΙΚΟ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Το μεγαλύτερο μέρος των κανονισμών αλλά και του ευρύτερου νομοθετικού πλαισίου που διέπει τη Ναυτιλία προέρχεται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό οργανισμό (ΔΝΟ ή ΙΜΟ).

Ο ΙΜΟ είναι ένας οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών με έδρα το Λονδίνο, που λειτουργεί μέσω ενός αριθμού εξειδικευμένων επιτροπών και υποεπιτροπών, καθεμιά από τις οποίες αποτελείται από αντιπροσώπους των κρατών μελών. Η Επιτροπή για τη Ναυτιλιακή Ασφάλεια (Maritime Safety Committee – MSC) είναι η παλιότερη από αυτές. Η Επιτροπή για την Προστασία του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection Committee – MEPC) ιδρύθηκε το 1973 και είναι υπεύθυνη για τον συντονισμό των δραστηριοτήτων του ΙΜΟ για την πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τη ναυτιλία (Σπυρίδων Ραπτοτάσιος, 2018). Παράλληλα, στον ΙΜΟ συμμετέχουν επιπλέον ως παρατηρητές χωρίς ψήφο, και επηρεάζουν τις αποφάσεις παρέχοντας στοιχεία ή έχοντας συμβουλευτικό ρόλο, πάνω από 40 διακυβερνητικές και 60 μη κυβερνητικές οργανώσεις, που εξυπηρετούν διάφορες ομάδες της ναυτιλιακής βιομηχανίας (π.χ. πλοιοκτήτες), των νομικών και περιβαλλοντικών οργανώσεων.

Οι κανονισμοί που δημιουργούνται και ακολουθούνται από τον Ναυτιλιακό κλάδο δεν είναι τυχαίοι, αλλά αντιθέτως βασίζονται είτε σε γεγονότα που προκύπτουν (π.χ. ατυχήματα) σε αυτόν ή σε ανάγκες που τον διέπουν. Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, η ταχύτητα αναπτυσσόμενη οικονομία απαιτούσε τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Το 1948 τα Ηνωμένα Έθνη συγκάλεσαν μια Ναυτιλιακή Διάσκεψη στη Γενεύη, στην οποία, μεταξύ άλλων, ιδρύθηκε ο IMCO (Inter governmental Maritime Consultative Organization) που αποτέλεσε πρόδρομο του ΙΜΟ (International Maritime Organization) όπου και πρακτικά δημιουργήθηκε το 1982. Από τότε και έπειτα ο ΙΜΟ

αγωνίζεται για τη βελτίωση και το καλό του ναυτιλιακού κλάδου σε παγκόσμιο επίπεδο.

Από το 1969 για τον Ναυτιλιακό κλάδο λειτουργεί η Επιτροπή Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος (MEPC) που εξετάζει διάφορα θέματα που σχετίζονται με τη θαλάσσια ρύπανση ενώ παράλληλα το 2005 τέθηκε και σε ισχύ το έκτο παράρτημα της σύμβασης MARPOL Παράρτημα VI που ασχολείται με την ατμοσφαιρική ρύπανση και περιλαμβάνει περιορισμούς που σχετίζονται με εκπομπές θείου, αζώτου, καθώς και γενικά των εκπομπών που αφορούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τον Οκτώβριο του 2008, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) στην 58η σύνοδό της ενέκρινε τις προτεινόμενες τροποποιήσεις στο παράρτημα VI της MARPOL, σχετικά με τους κανονισμούς για την μείωση των επιβλαβών εκπομπών από τα πλοία. Οι βασικές αλλαγές αναφέρονται στην σταδιακή μείωση των εκπομπών οξειδίων θείου (SO_x) από τα πλοία, με το παγκόσμιο όριο του θείου να μειώνεται αρχικά σε 3,50% (από 4,50%), από την 1η Ιανουαρίου 2012 και έπειτα σταδιακά σε 0,50 %, από την 1η Ιανουαρίου 2020, υπό τον όρο ότι μία μελέτη σκοπιμότητας θα έχει ολοκληρωθεί το αργότερο έως το 2018. Η μελέτη αυτή υπέδειξε την αναγκαιότητα του μέτρου αυτού και τον βαθμό εφικτότητας του και είχε ως συμπέρασμα την επιβεβαίωση της λήψης του συγκεκριμένου μέτρου. (Σπυρίδων Ραπτοτάσιος, 2018)

Την 1η Ιανουαρίου 2013 τέθηκαν σε ισχύ οι προβλέψεις του νέου Κεφαλαίου 4 του Παραρτήματος VI της MARPOL, το οποίο εισάγει μέτρα που έχουν στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας της ναυτιλίας, ώστε να περιοριστεί η κατανάλωση καυσίμων και οι εκπομπές CO₂ και πιο συγκεκριμένα εισάγεται ο Δείκτης Αποδοτικού Ενεργειακού Σχεδιασμού (Energy Efficiency Design Index – EEDI), ο οποίος αφορά κυρίως τεχνικά μέτρα, είναι υποχρεωτικός για τα νέα πλοία και στοχεύει στη διευκόλυνση της καινοτομίας και των τεχνολογικών βελτιώσεων στη ναυτιλία,. Σύμφωνα με τον κανονισμό αυτό, τα πλοία που κατασκευάστηκαν από το 2015 έως το 2010 έπρεπε να βελτιωθούν κατά 10%, από το 2020 έως το 2025 κατά 20%, και μετά το 2025 η βελτίωση θα ανέρχεται σε τουλάχιστον 30%.

Διάγραμμα 1: Εφαρμογή του EEDI



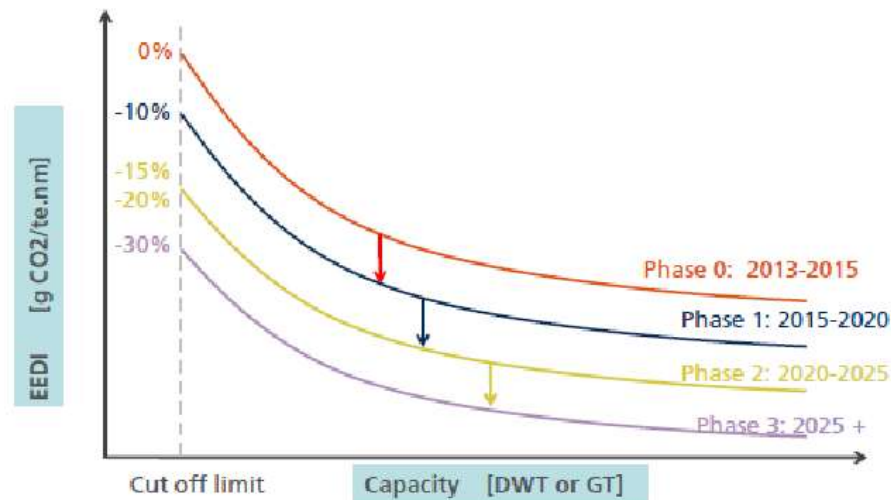
Πηγή: Εμού του ιδίου

Για τον υπολογισμό του παραπάνω δείκτη χρειαζόμαστε στον αριθμητή τον προσδιορισμό των εκπομπών CO₂ που προκύπτουν από την μηχανή του πλοίου ενώ στον παρονομαστή το μεταφορικό έργο.

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ Εκπομπές}}{\text{Μεταφορικό έργο}} = \frac{\text{Κόστος για το περιβάλλον από το πλοίο}}{\text{Ύψελος για την Κοινωνία}}$$

Ο δείκτης EEDI θεωρήθηκε ότι είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, διότι για πρώτη φορά είναι διαθέσιμος σε παγκόσμιο επίπεδο ένας δείκτης που εστιάζει στις εκπομπές CO₂ από κάποιο μέσο μεταφοράς, ώστε να βοηθήσει στην αύξηση της ενεργειακής αποτελεσματικότητας του μέσου αυτού. Παράλληλα ο δείκτης αποτελεί έναν δεσμευτικό ως προς την απόδοση, μηχανισμό. Δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε τεχνολογία. Αυτό σημαίνει πως σχεδιαστές και κατασκευαστές, μπορούν να επιλέξουν από τον πιο φθηνό, μέχρι τον πιο ακριβό μηχανισμό, αρκεί να υπάρχει συμμόρφωση με τον κανονισμό. Ο δείκτης προσδιορίζει έναν συγκεκριμένο αριθμό, για ένα συγκεκριμένο σχέδιο πλοίου, όπου εκφράζεται σε γραμμάρια διοξειδίου το άνθρακα ανά μίλι χωρητικότητας (όσο πιο μικρό τόσο πιο αποδοτικός ο σχεδιασμός του πλοίου) και υπολογίζεται από έναν τύπο, όπου λαμβάνει υπόψιν τις τεχνικές παραμέτρους σχεδίασης του πλοίου. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη μείωση συντελεστή EEDI ανάλογα με την περίοδο όπου το εκάστοτε πλοίο έχει κατασκευαστεί.

Εικόνα 3: Συντελεστές μείωσης EEDI στο πέρασμα του χρόνου



Πηγή: (Puisa, 2023)

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά από τον IMO σε ένα υποχρεωτικό εργαλείο διαχείρισης (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP), το οποίο αφορά λειτουργικά κυρίως μέτρα, για όλα τα πλοία (νέα και υπάρχοντα) και στόχος του είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας καυσίμου μέσω βελτιώσεων λειτουργίας. (Κωνσταντίνος Σοφιανίδης, 2021). Εγκρίθηκε από τον Διεθνή ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO, MEPC 62), και αναφέρεται στους κανονισμούς του. Κάθε SEEMP είναι συγκεκριμένο για κάθε πλοίο αλλά συνδέεται με μια ευρύτερη πολιτική διαχείρισης των ενεργειακών καταναλώσεων σε όλη την εταιρία που ανήκει το συγκεκριμένο πλοίο. Τρία είναι τα στάδια που προσδιορίζουν το πλάνο ενεργειακής διαχείρισης για τα πλοία. Σχεδιασμός – Εκτέλεση – παρακολούθηση.

Διάγραμμα 2: SEEMP Πλάνο



Πηγή: Εμού του ιδίου

Φυσικά, σε συνδυασμό με τα μέτρα αυτά του IMO δε θα μπορούσε να παραληφθεί και ο λειτουργικός δείκτης που αφορά στη μέτρηση των γραμμαρίων CO₂ ανά μεταφερόμενο φορτίο (Energy Efficiency Operating Index - EEOI). Ο EEOI είναι ένα εθελοντικό εργαλείο και δεν είναι υποχρεωτικό. Ο δείκτης αυτός ισούται με το συνολικό καύσιμο που καταναλώθηκε για ένα ταξίδι ή κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο επί το περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα (ως αριθμητή) προς το συνολικό μεταφερόμενο φορτίο επί την απόσταση στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που αναφέρθηκε ή το ταξίδι. Με άλλα λόγια:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{D \times M_{cargo}}, \text{ όπου } D \text{ είναι η απόσταση, } M \text{ είναι το μεταφερόμενο φορτίο, } C_F$$

είναι ο συντελεστής εκπομπής για το CO₂¹ και FC η ποσότητα καυσίμου που καταναλώθηκε. Ως j συμβολίζουμε το συγκεκριμένο ταξίδι ή τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

¹ Για MGO = 3.206, HFO = 3.114, LFO = 3.151, LNG = 2.750, LPG = 3.00-3.030

Το 2013 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε την ενσωμάτωση των εκπομπών στην πολιτική ατζέντα την Ευρωπαϊκής Ένωσης, με σκοπό την μείωση των εγχώριων εκπομπών, παραγόμενα από κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, εξετάζοντας τους κανονισμούς που έχει θέσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) για την παγκόσμια ναυτιλία, κρίθηκαν μη επαρκείς στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών από τις διεθνείς πλόες. Βάσει αυτού του εγχειρήματος, η Ευρωπαϊκή Ένωση προσπάθησε να εφαρμόσει ένα δικό της πλαίσιο σχετικά με την παρακολούθηση, υποβολή εκθέσεων και επαλήθευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), με την μέθοδο MRV (Monitor – Review – Verification). (Γκέργκες Μάριος, 2022). Ο κανονισμός αυτός τέθηκε σε εφαρμογή το 2019 για πλοία πάνω από 5.000 κόρους που καλούν σε λιμένες της ΕΕ και αυτό με σκοπό να πετύχει το στόχο που η ίδια έθεσε σχετικά με την μείωση έως και 50% των εκπομπών μέχρι το 2050. Ο κανονισμός αποτελεί εργαλείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με σκοπό την καταπολέμηση των εκπομπών που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, και την κλιματική αλλαγή.

Μετά τη επιβολή του MRV από την ΕΕ, ο IMO αποφάσισε να αναθεωρήσει το SEEMP, σε ένα εργαλείο παρόμοιο με το MRV αλλά σε παγκόσμια κλίμακα. Πρόκειται για το εργαλείο IMO DCS (Data Collection System) το οποίο τέθηκε σε ισχύ από 01/01/2019. Σκοπός με το εργαλείο αυτό είναι να γίνεται σε ετήσια βάση μια καταγραφή των καταναλώσεων του πλοίου, το χρόνο πλεύσης και της δανεισθείσας απόστασης του εκάστοτε πλοίου μιας και οι εκπομπές αερίων σχετίζονται με αυτά τα στοιχεία. Για το σκοπό αυτό τα δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου που αφορούν σε υπόχρεο πλοίο θα πρέπει να συλλέγονται και να υποβάλλονται από τις Διαχειρίστριες Εταιρείες συγκεντρωτικά στην ελεγκτική μονάδα. Από εκεί και έπειτα ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο και την κατάθεση αυτών στην ηλεκτρονική πλατφόρμα GISIS.

1.2 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΟΥ IMO ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΕ ΓΙΑ ΤΑ GHGs

Ο διεθνής ναυτιλιακός τομέας παραμένει σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένος από τα ορυκτά καύσιμα ενώ σύμφωνα με μελέτες είναι υπεύθυνος για περίπου 3% των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Το 2018, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO) θέσπισε μια στρατηγική στο πλαίσιο της σύμβασης πρόληψης ρύπανσης (MARPOL), η οποία προτείνει την προσπάθεια για μείωση 70% τις

άνθρακας έως το 2050 και μείωση 50% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) έως το 2050, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008. Δεδομένου ότι μέχρι την δεκαετία του 1980 οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου δεν λάμβαναν τη δέουσα σημασία, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός -ΙΜΟ, άλλαξε τα δεδομένα, με την αρχική του δραστηριότητα να αφορά κυρίως στη θαλάσσια ασφάλεια. Έτσι για πρώτη φορά έπειτα από πολλά χρόνια προσπαθειών, ο ΙΜΟ συμφώνησε για μία στρατηγική μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Συμφωνία των Παρισίων 2018).

Στο πλαίσιο αυτό της φιλόδοξης στρατηγικής του ο ΙΜΟ ενσωμάτωσε το 2018 τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ (UN SDGs) με το όραμα να απαρθρακοποιήσει την διεθνή ναυτιλία μέσα στην επόμενη δεκαετία. Με αυτό τον τρόπο, οι ναυτιλιακές εταιρείες κλήθηκαν να διαδραματίσουν εκτός των άλλων και σημαντικό ρόλο στην προώθηση των εννοιών βιωσιμότητας του ΟΗΕ.

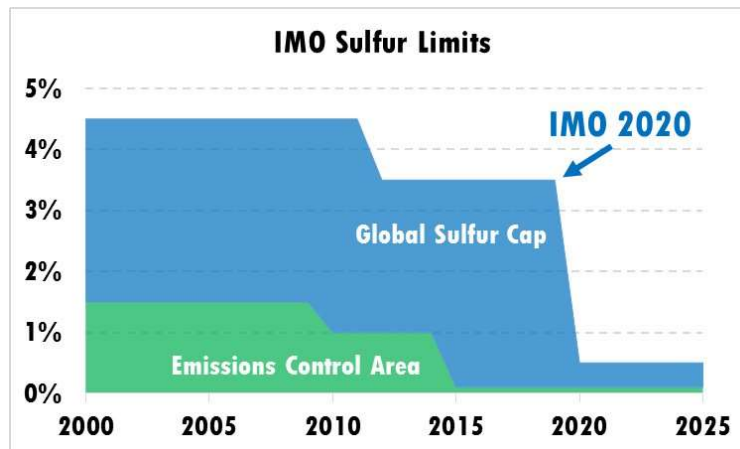
Οι μειώσεις των εκπομπών, η εφαρμογή της παραπάνω συμφωνίας και γενικότερα η επίτευξη των στόχων μπορεί να επιτευχθεί από την αύξηση της αποδοτικότητας των σκαφών, τόσο των υπάρχοντων όσο και των νέων. Για το σκοπό αυτό συνετάχθη ένα πρόγραμμα δράσεων με σκοπό την παρακολούθηση εφαρμογής της αρχικής στρατηγικής, όπου όρισε χρονοδιάγραμμα για την εξέταση των μέτρων μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Τα βραχυπρόθεσμα μέτρα ορίστηκαν τα έτη μεταξύ 2020 και 2023, καθώς αποτέλεσαν τη βάση για την εξέταση προτάσεων για μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα μέτρα (Χρύσα Μπινιάκου, 2020).

Στο πλαίσιο των βραχυπρόθεσμων μέτρων στόχος για τον ΙΜΟ, αποτέλεσε η μείωση των εκπομπών θείου με χρήση καυσίμων περιεκτικότητας σε θείο στο 0,5% από τον Ιανουάριο του 2020 ενώ στις περιοχές με ελεγχόμενες εκπομπές (Emission Control Areas -ECA) η μείωση φτάνει στο 0,1% ήδη από το 2015, με στόχο μια «καθαρότερη» ναυτιλία, όπως εγκρίθηκε από την Επιτροπή Προστασίας Θαλασσιού Περιβάλλοντος (MEPC) το 2016. Οι εκπομπές θείου εξαρτώνται από την λειτουργία των μηχανών του πλοίου και φυσικά από τον τύπο καυσίμου το οποίο χρησιμοποιείται. Σε συνδυασμό με αυτό την ίδια περίοδο οι Ναυτιλιακές Εταιρείες προβαίνουν είτε σε αγορές καυσίμων με περιεκτικότητα σε θείο μικρότερη από 0,50%, είτε σε μεγαλύτερη χρήση του MGO/MDO (Marine Gas Oil/Marine Diesel Oil), είτε ακόμα και στην χρήση scrubber². (Διαμάντης Λεωνίδας, 2023). Ειδικότερα, η χρήση scrubber προέκυψε λόγω του ότι

² Scrubber: είναι μια ομάδα συσκευών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αφαίρεση ορισμένων σωματιδίων ή/και αερίων από τα βιομηχανικά ρεύματα καυσαερίων

δεν ήταν και δεν είναι εύκολο τεχνικά ολόκληρη η ναυτιλιακή αγορά να κάνει χρήση αυτών των καινούριων πετρελαίων. Η προσφορά ποτέ δεν θα μπορούσε να καλύψει τα επίπεδα ζήτησης. Έτσι, σύμφωνα με την νέα αυτή στρατηγική του IMO μόνο τα πλοία που εφαρμόζαν και εφαρμόζουν τις παραπάνω επιλογές είχαν και έχουν το δικαίωμα να κάνουν ελεύθερες πλώες.

Διάγραμμα 3: Sulphur Cap 2020



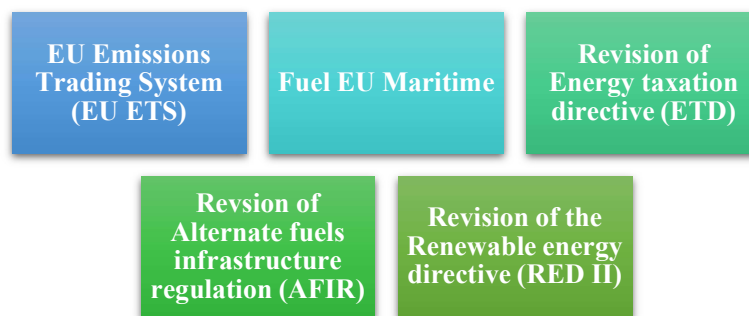
Πηγή: <https://www.searates.com/blog/post/imo-2020-low-sulphur-regulation>

Παρόμοιες ήταν και οι αποφάσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία θέσπισε το 2019, την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία με σκοπό να μετατρέψει την Ε.Ε. σε μια σύγχρονη, αποδοτική ως προς τους πόρους και ανταγωνιστική οικονομία, εξασφαλίζοντας μηδενικές καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050 και οικονομική ανάπτυξη αποσυνδεδεμένη από τη χρήση πόρων - «Delivering the European Green Deal 2019». Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία καλύπτει όλους τους τομείς της οικονομίας, ιδίως τις μεταφορές, την ενέργεια, τη γεωργία, τα κτίρια και βιομηχανίες, ενώ παράλληλα κάνει αναφορά σε μια αποδοτική χρήση των πόρων μεταβαίνοντας σε μια καθαρή, κυκλική οικονομία αποκαθιστώντας ταυτόχρονα την βιοποικιλότητα και τη μείωση της ρύπανσης.

Επιπλέον, την ίδια περίοδο, 2020, η Ε.Ε. αναλαμβάνει δράση για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, μέσω θέσπισης μιας δέσμης μέτρων, που θέτει τρεις βασικούς στόχους: 20% μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (από τα επίπεδα του 1990), 20% της ενέργειας της ΕΕ από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και 20% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Επίσης, η Ε.Ε. στηρίζει την ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, για παράδειγμα μέσω του προγράμματος που προωθεί τις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την χρηματοδότηση

του προγράμματος "Horizon 2020" για την έρευνα και την καινοτομία. (Διαμάντης Λεωνίδα, 2023).

Στη συνέχεια, τον Ιούλιο του 2021, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε δέσμη προτάσεων για προσαρμογή των κοινοτικών πολιτικών με στόχο τη μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% (σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990) έως το 2030. Πρόκειται για τη γνωστή δέσμη "Fit for 55" η οποία περιλαμβάνει νομοθετικές προτάσεις και πρωτοβουλίες πολιτικής σε μεγάλο φάσμα τομέων και θεμάτων, ενώ ο φιλόδοξος στόχος του 55% οδηγεί σε ευρείες και σχετικά γρήγορες αλλαγές στους κανονισμούς. Πιο συγκεκριμένα, για τις θαλάσσιες μεταφορές, οι βασικότερες αλλαγές της δέσμης "Fit for 55" περιλαμβάνουν την Πρωτοβουλία FuelEU Maritime, (εγκατάσταση ικανού αριθμού σημείων ανεφοδιασμού καυσίμων) τον κανονισμό για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων (Alternative Fuels Infrastructure Regulation - AFIR), την Οδηγία Φορολογίας Ενέργειας (Energy Taxation Directive - ETD) κατά την οποία τα καύσιμα αρχίζουν να φορολογούνται ανάλογα με τον ενεργειακό τους περιεχόμενο και τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις και την επέκταση του ΣΕΔΕ στις ναυτιλιακές μεταφορές. (IOBE, 2022).



Διάγραμμα 4: Fit for 55

Στο πλαίσιο της δέσμης "Fit for 55" συμπεριλήφθηκε και η παράταση της εκκίνησης εφαρμογής του κανονισμού EU ETS (σε 01/01/2024) και του Fuel EU (σε 01/01/2025) με το δεύτερο να κάνει αναφορά σε επιτάχυνση της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων για τα πλοία και χρήση της χερσαίας τροφοδοσίας από το 2030.

Πιο αναλυτικά, το Πρωτόκολλο του Κιότο προβλέπει τρεις (3) μηχανισμούς μέσω των οποίων οι χώρες δύνανται να επιτύχουν μείωση των εκπομπών τους από τα αέρια του θερμοκηπίου. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι: η Εμπορία Δικαιωμάτων εκπομπών τα

επονομαζόμενα allowances, τα προγράμματα Κοινής Εφαρμογής και οι Μηχανισμοί Καθαρής Ανάπτυξης. Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της πολιτικής της Ε.Ε. για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής καθώς και το βασικό της εργαλείο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Το ΣΕΔΕ θέτει ανώτατο όριο στις ποσότητες CO₂ που μπορούν να εκπέμπουν η βιομηχανία και οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνολικός όγκος των επιτρεπόμενων εκπομπών διανέμεται σε εταιρίες με τη μορφή δωρεάν κατανομή δικαιωμάτων εκπομπών CO₂, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν και αντικείμενο συναλλαγής. (Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών, 2023)

Μάλιστα η Οδηγία Φορολογίας Ενέργειας πρόκειται να αναπτυχθεί περισσότερο τα επόμενα χρόνια και να οδηγηθεί σε αυτό που σήμερα αποκαλούμε EU ETS και το οποίο πρόκειται να τεθεί σε εφαρμογή από το 2024 και μετά.

Το EU ETS είναι ένα σύστημα ανώτατων ορίων και εμπορίου που ιδρύθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τη ρύθμιση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη μείωση τους κατά 50% το 2023 σε σύγκριση με το 1990. Θέτει ανώτατο όριο στη συνολική ποσότητα CO₂ για αρχή ενώ στη συνέχεια θα τεθούν όρια και για όλα τα αέρια του θερμοκηπίου που μπορούν να εκπέμψουν οι βιομηχανίες εντός το πεδίο εφαρμογής του. Στις εταιρίες κατανέμονται δικαιώματα εκπομπών, τα οποία μπορούν να αγοραστούν, να πωληθούν ή να διαπραγματευτούν μέσω ενός ελεγχόμενου από την ΕΕ συστήματος δημοπρασιών, ανάλογα με τα επίπεδα εκπομπών τους. (RINA, 2023). Συγκεκριμένα όσον αφορά τις ναυτιλιακές εταιρίες το διαθέσιμο ποσό δικαιωμάτων εκπομπών για τη βιομηχανία θα μειώνεται σταδιακά κάθε χρόνο, κατά 4,3% έως το 2027 και 4,4% από το 2028. Σύμφωνα με τον κανονισμό κάθε πλοίο που εισέρχεται ή εξέρχεται από κάποιο Ευρωπαϊκό Λιμάνι ή πλέει μεταξύ Ευρωπαϊκών Λιμανιών θα πρέπει να «πληρώνει» για τους ρύπους που εκπέμπει και με άλλα λόγια να έχει το «δικαίωμα» να ρυπαίνει. Εάν μια εταιρεία εκπέμπει περισσότερα αέρια θερμοκηπίου από τα δικαιώματα που της έχουν κατανεμηθεί, πρέπει να αγοράσει πρόσθετα δικαιώματα από την αγορά για να καλύψει τις υπερβολικές εκπομπές. Αντίθετα, εάν μια εταιρεία εκπέμπει λιγότερα αέρια θερμοκηπίου από τα δικαιώματά της, μπορεί να πουλήσει τα πλεονάζοντα δικαιώματα σε άλλες εταιρίες.

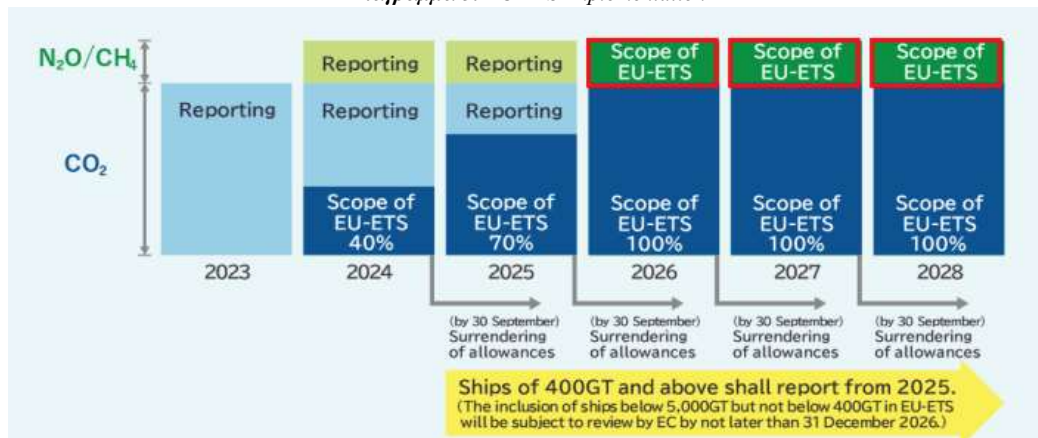
Ο τρόπος υπολογισμού των αέριων εκπομπών για τις οποίες θα πρέπει να πληρώσει η ναυτιλιακή εταιρία είναι ως ακολούθως:

1^η Χρονιά το 40% του συνόλου των ακόλουθων εκπομπών:

- 1) Το 50% των CO₂ Αέριων εκπομπών για ταξίδια από ή προς Ευρωπαϊκά Λιμάνια
- 2) Το 100% των CO₂ Αέριων εκπομπών για ταξίδια εντός Ευρωπαϊκών Λιμανιών
- 3) Το 100% των CO₂ Αέριων εκπομπών για την διάρκεια παραμονής μέσα στο Ευρωπαϊκό Λιμάνι.

Αντίστοιχα 2^η χρονιά το 70% των ανωτέρων και από εκεί και έπειτα το 100% αυτών. Μάλιστα από το 2026 και μετά εκτός από το CO₂ θα συνυπολογίζονται και υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και το μεθάνιο (CH₄). (EU-ETS for Shipping, 2023) Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη χρονική εφαρμογή του συγκεκριμένου κανονισμού.

Διάγραμμα 5: EU ETS Implementation



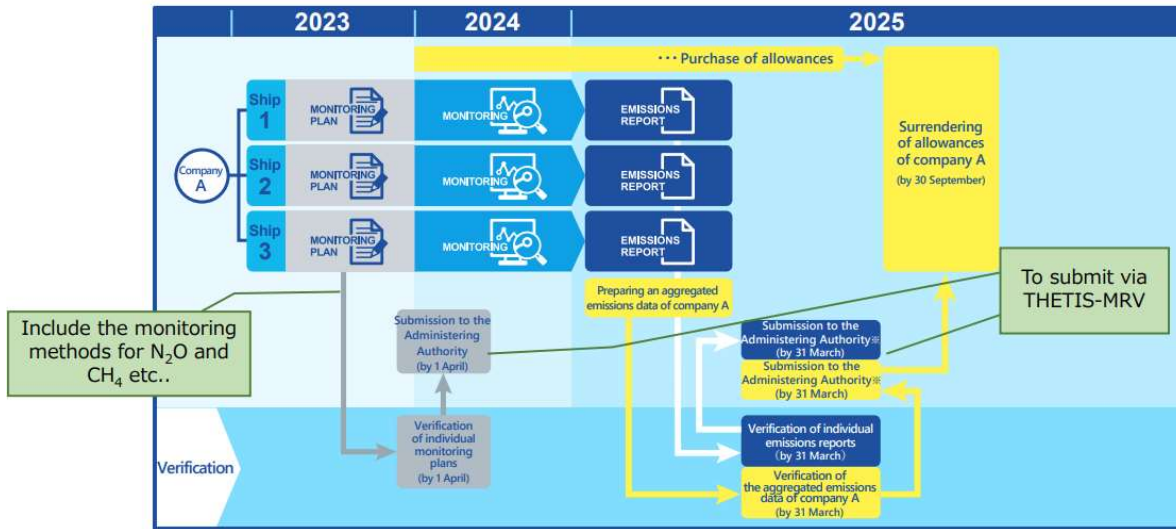
Πηγή: ClassNK Report – November 2023

Για το 2023 οι ναυτιλιακές εταιρίες οφείλουν να ξεκινήσουν την αναπροσαρμογή του EU MRV Monitoring Plan όλων των πλοίων τους που εμπίπτουν στον κανονισμό, η οποία θα ολοκληρωθεί στην αρχή του 2024 έστω και σε μια «pre-assessed» μορφή. Στη συνέχεια και μέχρι αρχές Απριλίου θα πρέπει το ίδιο πλάνο να συμπεριληφθεί μέσα στην ιστοσελίδα του MRV THETIS όπου και θα επικυρωθεί από την εκάστοτε κλάση που η κάθε εταιρία έχει ως ελεγκτή (Verifier). Καθ' όλη τη διάρκεια της χρονιάς (2024) και μέχρι το Σεπτέμβριο του 2025 η εκάστοτε εταιρία θα μπορεί και θα πρέπει να έχει δεσμεύσει (αγοράσει) τα δικαιώματα για να ρυπαίνει. Στις 31/03/2025 θα γίνει η κατάθεση των αποτελεσμάτων για το κάθε πλοίο στον IMO για το IMO DCS και μέχρι τις 30/04/2025 τα αποτελέσματα για το MRV & EU ETS μέσω του MRV THETIS. Στην συνέχεια μέχρι τον Ιούνιο του 2025 θα ολοκληρωθεί η διαδικασία της

αξιολόγησης και επικύρωσης των αποτελεσμάτων και μέχρι τις 30/09/2025 η επιβεβαίωση της «πληρωμής» και των δικαιωμάτων ρύπανσης για το EU ETS.

Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει την διαδικασία εφαρμογής μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2025.

Διάγραμμα 6: Χρονική Εφαρμογή του EU ETS μέχρι το 2025



Πηγή: ClassNK Report – November 2023

1.3 ΑΛΛΟΙ ΝΕΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ 2023-2030

Η μείωση των αέριων εκπομπών από την Ναυτιλία είναι ένα ταξίδι του οποίου ο δρόμος είναι ασαφής και ο τελικός στόχος ενώ αφορά σε ένα ποσοστό το οποίο θα αποτυπώνει μηδενικές εκπομπές δεν είναι εύκολο μέχρι και σήμερα να προσδιοριστεί στο χρόνο. Η ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων σχετίζεται με την ποσότητα της ενέργειας του καυσίμου που καταναλώνεται σε σχέση με τον όγκο της εργασίας μεταφοράς που εκτελείται. Και μόνο από τον αριθμό των παραγόντων που εμπλέκονται είναι κατανοητό το πόσο δύσκολος μπορεί να είναι ο προσδιορισμός.

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 νέους κανονισμούς τόσο αναφερόμενους στην λειτουργικότητα του πλοίου αλλά και στην τεχνική και μηχανική του σκοπιά. Οι νέοι αυτοί κανονισμοί βασίζονται στο ότι συνολικά, από την μία πλευρά το EEDI έχει τεκμηριωθεί ως ένα μέτρο που μπορεί να συμβάλει στον έλεγχο της έντασης του των ρύπων των νέο-κατασκευαζόμενων πλοίων και από την άλλη πλευρά ότι η ενεργειακή απόδοση των υφισταμένων πλοίων είναι

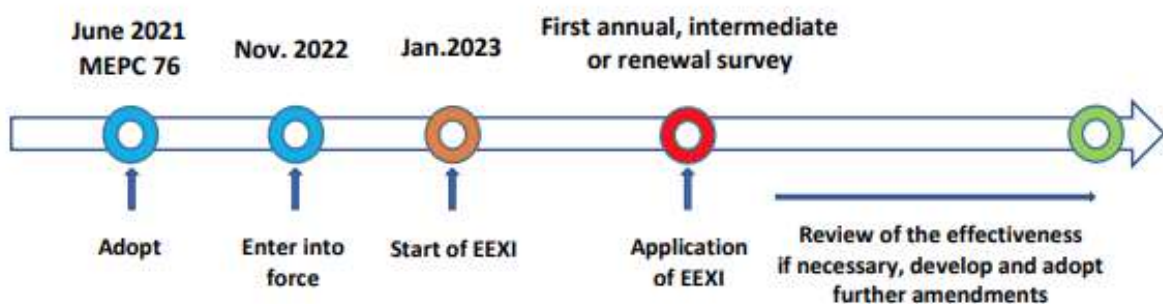
επίσης ένα πολύ σημαντικό γεγονός που έπρεπε να ελεγχθεί. (ΚΟΡΦΙΑΤΗΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ, 2022)

1.3.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ EEXI (Energy Efficiency Index for Existing Ships)

Για το σκοπό αυτό και για να υπάρξει ένας τρόπος αντιμετώπισης, ο IMO θέτει σε εφαρμογή από το 2023 ένα καινούριο κανονισμό που ονομάζεται Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης των Υφισταμένων Πλοίων (Energy Efficiency Index for Existing Ships - EEXI) για τη μέτρηση των εκπομπών CO₂ ανά μεταφορικό έργο, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους σχεδιασμού ενός πλοίου. (Ernest Czermański, 2022). Ο EEXI δεν απαιτεί καμία μέτρηση ή αναφορά των πραγματικών εκπομπών CO₂ κατά τη λειτουργία του πλοίου μιας και πρόκειται πάλι για τεχνικό δείκτη και όχι λειτουργικό.

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. 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), ενώ κάθε πλοίο θα πρέπει να έχει στην κατοχή του ένα τεχνικό αρχείο EEXI, το λεγόμενο «New Technical File». Το τεχνικό αυτό αρχείο EEXI πρέπει να περιλαμβάνει τον υπολογισμό του EEXI με τη σχετική τεκμηρίωση και θα πρέπει να υποβληθεί στον εκάστοτε Νηογνώμονα για επικύρωση πριν τον πρώτο προγραμματισμένο ετήσιο, ενδιάμεσο ή 5ετες έλεγχο του πλοίου μετά την 01/01/2023. Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει το χρονικό της εφαρμογής του κανονισμού αυτού από το 2021 μέχρι το 2023 όπου και γίνεται η εφαρμογή του. (Ρίγος Νικόλαος, 2022)

Διάγραμμα 7: Χρονική Εφαρμογή του EEXI



Πηγή: (Ρίγος Νικόλαος, 2022)

Τα EEXI είναι ένας δείκτης σχεδιασμού που αναλύει το πλοίο σε ιδανικές θαλάσσιες συνθήκες, οι οποίες βασίζονται στο πλοίο να πλέει στην προβλεπόμενη ταχύτητα σε βαθύ νερό, με βύθισμα σε γραμμή φόρτωσης που ονομάζεται Summer Draught, με ήρεμο καιρό χωρίς αέρα ή κύματα. Τα πλοία που είναι σχετικά νέα μπορεί να επωφεληθούν σημαντικά από τον κανονισμό του EEXI επειδή δεν λαμβάνει υπόψη τον χρόνο κατασκευής του πλοίου.

Για τα πλοία όπου:

$$\mathbf{Attained\ EEXI \geq Required\ EEXI}$$

Με το Required EEXI να ισούται με:

$$\mathbf{Required\ EEXI = (1 - X/100) * Reference\ line\ value}$$

Και το Reference EEXI ισούται με:

$$\mathbf{Reference\ EEXI = a * b^{-c}}$$

α, b, c συγκεκριμένοι παράμετροι που ορίζονται από τον κανονισμό

τότε ο κανονισμός τίθεται σε ισχύ και πρέπει να παρθούν μέτρα ώστε να γίνει το Attained EEXI μικρότερο έστω και κατά μία μονάδα. Όσον αφορά την εφαρμογή των μέτρων, αυτά αφορούν στον περιορισμό της ισχύος του άξονα ή του κινητήρα (SHaPoLi / EPL), την Εγκατάσταση εξοπλισμών που οδηγούν στην εξοικονόμηση ενέργειας ή τη χρήση/μετατροπή καυσίμου σε καύσιμο χαμηλών εκπομπών. Αναφορικά με την πρώτη επιλογή που είναι και πιο εύκολη/άμεση η εφαρμογή, θα πρέπει να συνοδεύεται και από ένα εγχειρίδιο επί του πλοίου που θα περιγράφει τη διαδικασία για τη σωστή εφαρμογή και χρήση του εξοπλισμού που έχει εφαρμοστεί επί του πλοίου. Αυτό ονομάζεται Onboard Management Manual (OMM) και πρέπει να είναι επικυρωμένο από τον νηογνώμονα του πλοίου. (<https://www.dromon.com/>, 2022). Σε περίπτωση ανάγκης από το πλοίο να ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ στην περίπτωση του EPL θα πρέπει να γίνει αφαίρεση της σφράγισης του κινητήρα ενώ στην περίπτωση του ShaPoLi γίνεται απενεργοποίηση του αλάρμ και το πλοίο συνεχίζει να ανεβάζει ισχύ και στροφές ανάλογα με την ανάγκη. Υπάρχουν ελάχιστοι λόγοι για τους οποίους το πλοίο μπορεί να ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ και αυτοί αφορούν την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, τις αντίξοες καιρικές συνθήκες, την πειρατεία, τις εντολές του πιλότου κ.α. Για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις υποχρέωση του αξιωματικού βάρδιας είναι να κάνει την αντίστοιχη

καταγραφή, που θα περιλαμβάνει το λόγο και το χρόνο, στο βιβλίο γέφυρας αλλά και στο εγχειρίδιο καταγραφής OMM.

Αναφορικά με κάποιες ανησυχίες που προκύπτουν από την εφαρμογή του EEXI θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τις ακόλουθες ενδεικτικά. Αρχικά, σε ένα πλοίο που είτε λόγω αναμονών έξω από λιμάνια είτε λόγω πολλών μηνών έλλειψης καθαρισμού, η γάστρα του είναι ρυπασμένη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, το πλοίο πολύ πιθανόν να πρέπει να αυξήσει την ισχύ της μηχανής του, που απαιτείται για τη διατήρηση του ίδιου ρυθμού περιστροφής/στροφών, γεγονός που θα οδηγούσε σε ανάγκη για λειτουργία πέρα από το όριο ροπής/ταχύτητας του κινητήρα που ορίζει ο κανονισμός. Αυτό με τη σειρά του θέτει σε κίνδυνο ακόμα και την ασφάλεια του πλοίου. Επίσης, σε παλαιότερα πλοία που κάνει εφαρμογή ο κανονισμός δεν λαμβάνεται υπόψιν κατά τον υπολογισμό και την εγκατάσταση η φθορά του ίδιου του κινητήρα, ενώ παράλληλα σε πλοία που απαιτούν αρκετή μείωση στην ισχύ του κινητήρα αυτό δημιουργεί πολλές φορές την δυσαρέσκεια των Ναυλωτών με αποτέλεσμα και την χειροτέρευση της εμπορικής εικόνα αυτού.

Έως το 2030, η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σύμφωνα με το EEXI θα είναι διαφορετική από αυτήν που προβλέπεται σήμερα, διότι νέα πλοία θα εισαχθούν στην αγορά ως άμεσες αντικαταστάσεις των υπάρχοντων πλοίων τα οποία θα αποσύρονται λόγω ηλικίας είτε ως πλοία που εισάγονται στην αγορά ως νεότευκτα για να καλύψουν την αυξημένη εμπορική ζήτηση. Τα νέα πλοία όμως που κατασκευάζονται από το 2022 και μετά θα πληρούν ήδη τις απαιτήσεις του EEXI. Η επίτευξη ενεργειακής αποδοτικότητας στη λειτουργία των πλοίων μέσω μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας είναι ιδιαίτερα δύσκολη όταν η διαχείριση των πλοίων γίνεται από πολλά διαφορετικά τρίτα μέρη (Ναυτιλιακές Εταιρίες), με αποτέλεσμα τη δημιουργία χρονικών κενών στην ενεργειακή αποδοτικότητα. (Ernest Czermanski, 2022)

1.3.2 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ CII (Ship's Carbon Intensity Indicator)

Ο δείκτης έντασης άνθρακα – Carbon Intensity (CII) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πόσο αποτελεσματικά λειτουργούν τα πλοία. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για τον δείκτη που υπολογίζει τις πραγματικές εκπομπές CO₂. Ο συγκεκριμένος δείκτης δεν διαθέτει μηχανισμό επιβολής όπως συμβαίνει με το EEXI και δεν υπάρχουν συνέπειες για τη μη συμμόρφωση με συγκεκριμένα deadlines.

Ο τρόπος αξιολόγησης για τον δείκτη CII γίνεται μέσω των δεδομένων των πλοίων που κατατίθενται για το IMO DCS και το αποτέλεσμα του δείκτη που πετυχαίνει το κάθε πλοίο βαθμολογείται από το A έως το E σε ετήσια βάση ξεκινώντας από 01/01/2023. Σύμφωνα με την MEPC76 αν ένα πλοίο λάβει βαθμολογία D για τρία συνεχόμενα χρόνια ή E για ένα χρόνο τότε υποχρεούται να καταθέσει ένα αναθεωρημένο πλάνο SEEMP μέσα σε ένα μήνα από την ημερομηνία όπου και ανακοινώθηκε η βαθμολογία του με το οποίο θα περιγράφει ποιες ενέργειες και ποια μέτρα θα ακολουθηθούν ώστε το πλοίο να πετύχει την επόμενη χρονιά το επίπεδο C όπου και είναι η επιθυμητή βαθμολογία. Για τον υπολογισμό και την αξιολόγηση ενός πλοίου σχετικά με το CII ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία κατά την οποία υπολογίζεται αρχικά το σημείο αναφοράς του δείκτη για το εκάστοτε πλοίο ή αλλιώς όπως ονομάζεται CII Reference Line.

$$CII Ref = a * Capacity^{-c}$$

Με CII_{ref} να είναι η τιμή του δείκτη του έτους 2019 και «a, c» να αποτελούν σταθερές ή παράμετροι με βάση τον κανονισμό και διαφοροποιούνται με βάση το είδος του πλοίου (πλοίο χύδην φορτίου, δεξαμενόπλοιο, μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κ.α.) αλλά και τη χωρητικότητα αυτού.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το επίπεδο του δείκτη που κάθε πλοίο δε θα πρέπει να ξεπερνά ώστε να υπακούει στον κανονισμό, ενώ τέλος υπολογίζεται το επίπεδο του CII που τελικά πετυχαίνει το πλοίο με βάση την πραγματική και καθημερινή του λειτουργία. Πρόκειται για το Required CII & το Attained CII.

$$CII Required = \frac{100 - Z}{100} * CII Ref$$

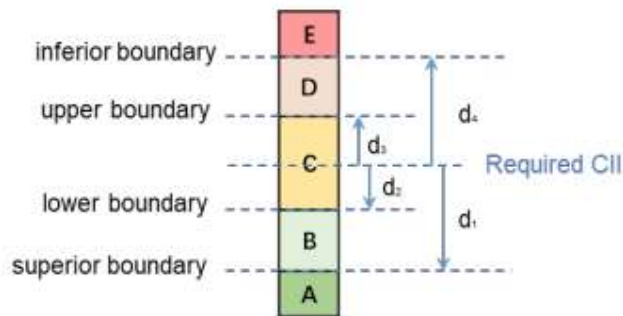
Σύμφωνα με την MEPC 76 απαιτείται από τα πλοία να μειώνουν τις εκπομπές κατά 1% ετησίως έως το 2023 και 2% από το 2023 έως το 2026, διατηρώντας τις μειώσεις ανοιχτές μέχρι το 2030. Το 2030, το CII θα πρέπει να είναι 40% χαμηλότερο από το 2008. (OMBOGA, 2022)

$$Attained CII = \frac{CO2 Emissions}{Distance * DWT} * 1000000$$

Αφού γίνει ο υπολογισμός ακολουθεί η σύγκριση και η βαθμολογία του πλοίου από A έως E. Η βαθμολογία/αξιολόγηση σε αυτή την κλίμακα αποτελείται από ένα κάτω και ένα πάνω όριο σε κάθε περίπτωση. Τα όρια αυτά μπορούν να προσδιοριστούν από τον

ετήσιο απαιτούμενο λειτουργικό δείκτη CII (Required CII) σε συνδυασμό με κάποια όρια ή όπως αποκαλούνται από τον κανονισμό «boundaries» (d_1 , d_2 , d_3 , d_4) υποδεικνύοντας έτσι την κατεύθυνση και την απόσταση που αποκλίνει από την απαιτούμενη τιμή (που συμβολίζονται ως dd διανύσματα για εύκολη αναφορά). Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει τα όρια αυτά κάνον διακριτή την βαθμολογία που μπορεί να έχει ένα πλοίο.

Εικόνα 4: dd όρια για το διαχωρισμό των ορίων του CII



Πηγή: ((MEPC), 2021)

Σκοπός για το κάθε πλοίο σύμφωνα με τα παραπάνω είναι να παραμένει μέσα στην κίτρινη περιοχή, δηλαδή στα επιθυμητά επίπεδα όπως τα ορίζει ο κανονισμός συναρτήσει του συγκεκριμένου πλοίου.

Τα πλοία που έχουν επιτύχει χαμηλότερο CII ενδέχεται να είναι σε θέση να έχουν υψηλότερη τιμή ναύλωσης λόγω της «πράσινης» κατάστασής τους. Με άλλα λόγια γίνονται απ' ευθείας πιο προσιτά στους ναυλωτές. Κατά τον καθορισμό ναύλων, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το CII, καθώς και η ανάγκη του ιδιοκτήτη να το λαμβάνει πίσω μετά το πέρας της ναύλωσης σε ίδιο αν όχι και καλύτερο επίπεδο (βαθμολογία) (Omboga, 2022). Αν και το βάρος για τη διασφάλιση υψηλής βαθμολογίας CII βαρύνει τον ιδιοκτήτη μιας και εκείνος είναι υπόλογος στον κανονισμό στο τέλος της χρονιάς, ιδιοκτήτης και ναυλωτής μπορεί να χρειαστεί να συνεργαστούν για να επιτύχουν τη μείωση των εκπομπών από το εκάστοτε πλοίο αλλά και το στόχο που μπορεί να είχαν θέσει αρχικά κατά τη ναύλωση. Άλλωστε όπως ήδη έχει ανακοινωθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή από την 01/01/2024 τίθεται σε εφαρμογή ο κανονισμός του EU ETS (που έγινε αναφορά και λίγο παραπάνω) όπου η εκπομπή των αερίων του

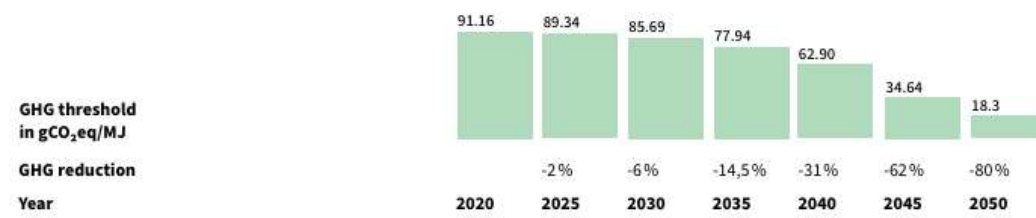
θερμοκηπίου δεν θα είναι πλέον δωρεάν αλλά θα ενταχτούν στο πλαίσιο των χρηματοπιστωτικών αγορών, γεγονός που σίγουρα θα επηρεάσει και το CII.

1.3.3 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ FuelEU

Το 2023, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) ενέκρινε και έναν επιπλέον κανονισμό για τη χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών καυσίμων, χαμηλού άνθρακα στη ναυτιλία, γνωστό και ως κανονισμός FuelEU Maritime. Ο κανονισμός αυτός έχει ως στόχο την προώθηση της βιώσιμης εμπορικής ναυτιλίας στην ΕΕ, θέτοντας υποχρεωτικά όρια για την ένταση αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από την ενέργεια που χρησιμοποιείται στα πλοία. Επίσης, εισάγει την υποχρέωση χρήσης εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας από την ακτή/λιμάνι ή τεχνολογίας μηδενικών εκπομπών στα λιμάνια. (Affairs Team European, 2023)

Πρόκειται για έναν κανονισμό που πρόκειται να είναι υποχρεωτικός σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ από το 2025 και που για πρώτη φορά το κριτήριο για την αξιολόγηση δεν είναι η κατανάλωση των πλοίων αυτού καθ' αυτού αλλά η ενέργεια που προέρχεται/παράγεται από την χρήση αυτών. Επιπλέον πλέον με τον κανονισμό αυτό δεν αναφερόμαστε μόνο σε CO₂ εκπομπές αλλά στο σύνολο των αερίων εκπομπών του θερμοκηπίου συμπεριλαμβανομένων εκτός του CO₂, του νιτρικού οξειδίου (N₂O) και του μεθανίου (CH₄). Παράλληλα, το μέσο ποσό αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται ανά μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται σε ένα πλοίο κατά τη διάρκεια ενός έτους δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο. Αυτό το όριο υπολογίζεται με τη μείωση μιας αναφερόμενης τιμής των 91,16 γραμμαρίων CO₂-ισοδύναμου ανά μεγατζούλ (MJ) με διαφορετικά ποσοστά με την πάροδο του χρόνου. Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει αυτά τα ποσοστά.

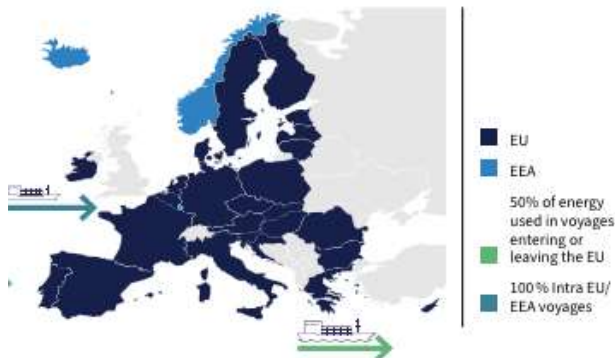
Διάγραμμα 8: Ποσοστά μείωσης των CO₂-ισοδύναμου ανά μεγατζούλ (MJ) στο πέρασμα των χρόνων



Πηγή: (Affairs Team European, 2023)

Ο κανονισμός θα ισχύει για πλοία με χωρητικότητα (GT) που υπερβαίνει τους 5000, ανεξαρτήτως της σημαίας τους, όταν εμπλέκονται στην εμπορική μεταφορά επιβατών ή φορτίων και επισκέπτονται λιμάνια της ΕΕ ή χωρικά ύδατα αυτής. Όσον αφορά τον

υπολογισμό της έντασης αερίων του θερμοκηπίου, ο κανονισμός FuelEU βασίζεται σε αυτόν του MRV καταμετρώντας το 100% της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα πλοία σε διαδρομές που πραγματοποιούνται μεταξύ λιμανιών της ΕΕ και κατά τη διάρκεια παραμονής του πλοίου μέσα στην ΕΕ και το 50% της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα πλοία για τα ταξίδια που πραγματοποιούνται μεταξύ λιμανιών της ΕΕ και λιμανιών εκτός ΕΕ καθώς και το αντίστροφο. (Verifavia Shipping, 2024) Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει τον κανονισμό.



Εικόνα 5: FuelEU Maritime υπολογισμός ενέργειας

Σκοπός μέσω του κανονισμού αυτού είναι η στροφή των εταιριών προς την χρήση εναλλακτικών καυσίμων για τα πλοία τους. Στο πλαίσιο αυτό και για την προώθηση της γρήγορης ανάπτυξης και υιοθέτησης βιώσιμων καυσίμων, όπως είναι η Αμμωνία, η Πράσινη Μεθανόλη κλπ που μπορούν να καλύψουν τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναγνωρίζει τη σημασία της εισαγωγής συγκεκριμένων κινήτρων προσαρμοσμένων στα Ανανεώσιμα Καύσιμα μη Βιολογικής Προέλευσης, τα λεγόμενα RFNBO ή Renewable Fuels of Non-Biological Origin. Παράλληλα προωθεί, με σκοπό την άμεση συμμόρφωση, οι ιδιοκτήτες πλοίων να μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια συνδυασμένη λύση εξοικονόμησης ενέργειας και χαμηλού άνθρακα καυσίμων.

Παράλληλα αξίζει να σημειωθεί ότι αν κατά την διαδικασία αξιολόγησης των πλοίων από τον εκάστοτε νηογνώμονα, που θα πραγματοποιείται μια φορά το χρόνο, παρατηρηθεί ότι το ποσό αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται ανά μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται σε ένα πλοίο κατά τη διάρκεια ενός έτους ξεπεραστεί τότε ένα πέναλτι θα πρέπει να επιβάλλεται και να πληρώνεται.

Το ποσό της ποινής είναι περίπου ίσο με 60 ευρώ ανά γιγατζούλ ενέργειας για το πλοίο που δεν συμμορφώνεται με τους κανονισμούς. Μάλιστα, τα πλοία εμπορευματοκιβωτίων και επιβατικά πλοία που δεν θα χρησιμοποιούν ενέργεια από τη

στεριά θα πρέπει να καταβάλουν ένα πρόστιμο (penalty) για κάθε ώρα μη συμμόρφωσης. (ZADKOVICH ZEILER FLOYD, 2023)

Ο υπολογισμός αυτού του πέναλτι έχει ως εξής:

$$\text{Penalty} = \frac{\text{GHG Intensity limit of the year} - \text{GHG Intensity of the ship}}{\text{GHG Intensity of the Ship}} \times \text{Energy Used on Board} \times \text{Penalty per energy used}$$

Το παραπάνω πέναλτι θα πρέπει να πληρώνεται κάθε 30 Ιουνίου της επόμενης χρονιάς. Όταν η εταιρία πληρώσει το πέναλτι αυτό τότε θα θεωρείται ότι συμμορφώνεται με τον κανονισμό και άρα θα μπορεί να λάβει από την αντίστοιχη αρχή τα πιστοποιητικά για τα πλοία της (Document of Compliance). Τα έσοδα από τα πέναλτι αυτά θα χρησιμοποιηθούν σύμφωνα με τον κανονισμό για την εισαγωγή όλο και περισσότερων ανανεώσιμων και χαμηλών σε διοξειδίο του άνθρακα καυσίμων στον ναυτιλιακό κλάδο. Σε συνδυασμό με αυτό σκοπός είναι να κατασκευαστούν και άλλες επίγειες λύσεις ώστε να παρέχεται περισσότερη ενέργεια στα πλοία από την ξηρά (λιμάνι) και παράλληλα να βοηθηθεί η ανάπτυξη, η δοκιμή αλλά και την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών ώστε να επιτευχθεί ο αρχικός στόχος της μείωσης των αέριων εκπομπών του θερμοκηπίου από τα πλοία.

Οι ναυτιλιακές εταιρίες έχουν τρεις τρόπους αξιοποίησης και αντιμετώπισης του πλεονάσματος ή του ελλείματος αντίστοιχα που προκύπτει στο τέλος της κάθε χρονιάς αναφορικά με την ένταση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG Intensity) τους ρύπους για το FuelEU. Πρόκειται για το δικαίωμα «Κατάθεσης» (Banking), «Δανεισμού» (Borrowing) ή Ομαδοποίησης (Pooling).

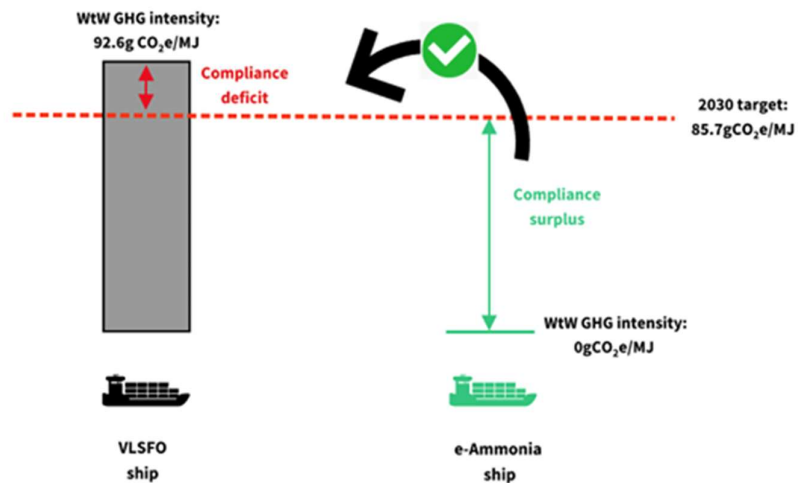
Συγκεκριμένα, αν η ένταση αερίων του θερμοκηπίου ενός πλοίου κατά το έτος αναφοράς επιτύχει το όριο έντασης αερίων του θερμοκηπίου του έτους (δηλαδή η πραγματική ένταση αερίων του θερμοκηπίου είναι κάτω από το όριο), το πλεόνασμα συμμόρφωσης μπορεί να μεταφερθεί για τον υπολογισμό του προστίμου του ίδιου πλοίου για το επόμενο έτος. Η «Κατάθεση» και φύλαξη (Banking) των ρύπων ως πλεόνασμα θα πρέπει να καταχωρείται στη βάση δεδομένων FuelEU από τη ναυτιλιακή εταιρεία μετά την έγκριση από τον ελεγκτή Νηογνώμονα (Verifier).

Από την άλλη εάν η ένταση αερίων του θερμοκηπίου ενός πλοίου κατά το έτος αναφοράς υπερβαίνει το όριο έντασης αερίων του θερμοκηπίου εκείνου του έτους (δηλαδή, το πλοίο έχει έλλειμμα συμμόρφωσης), το πλοίο μπορεί να δανειστεί (Borrowing) ένα πλεόνασμα συμμόρφωσης από το επόμενο έτος. Δεν είναι δυνατόν να

δανειστεί για 2 συνεχόμενα έτη ένα πλοίο και το ποσό που μπορεί να δανειστεί είναι έως και 2% του ορίου της έντασης των αερίων του θερμοκηπίου για το έτος πολλαπλασιαζόμενο με την κατανάλωση ενέργειας του έτους.

Τέλος, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των αντίστοιχων πλοίων που πέτυχαν ή δεν πέτυχαν το όριο της έντασης των αερίων του θερμοκηπίου μπορούν να ομαδοποιηθούν εντός ενός στόλου και να κατανεμηθούν μεταξύ τους στην ομάδα (ομαδοποίηση - *Pooling*). Με άλλα λόγια, ένα πλεόνασμα συμμόρφωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ενός πλοίου μπορεί να μεταφερθεί σε ένα άλλο πλοίο που έχει έλλειμμα συμμόρφωσης για να αντισταθμιστεί το ποσό του προστίμου. Η ομαδοποίηση μπορεί επίσης να συσταθεί από δύο ή περισσότερες ναυτιλιακές εταιρείες, ωστόσο ένα πλοίο δεν μπορεί να είναι σε περισσότερες από μία ομάδες και η σύνθεση των πλοίων στην ομάδα πρέπει να είναι τέτοια ώστε το άθροισμα των πλεονασμάτων συμμόρφωσης της έντασης των αερίων του θερμοκηπίου να υπερβαίνει το άθροισμα των ελλειμμάτων συμμόρφωσης. (ClassNK, 2023)

Εικόνα 6: Παράδειγμα *Pooling* 2 πλοίων (ένα συμβατικό & ένα Αμμωνίας)



Πηγή: (Chiara Mingozzi, 2023)

1.4 ΖΗΤΗΣΗ ΓΙΑ ΠΡΑΣΙΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΑΠΟ ΠΕΛΑΤΕΣ

Μία εταιρεία η οποία δραστηριοποιείται στον χώρο της ναυτιλίας μπορεί να θεωρηθεί πράσινη όταν προσπαθεί να περιορίσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και προωθήσει τεχνικές που προστατεύουν το περιβάλλον. Στις μέρες μας δεν είναι λίγες οι ναυτιλιακές επιχειρήσεις όπου στην προσπάθειά τους να μετριάσουν την επιρροή που έχουν προς το περιβάλλον εφαρμόζουν Πράσινες Ναυτιλιακές Πρακτικές (Green Shipping Practices – GSPs).

Είναι γεγονός ότι η ναυτιλία η οποία μεταφέρει περίπου το 90% του παγκόσμιου εμπορίου και είναι, στατιστικά, ο λιγότερο επιβλαβής για το περιβάλλον τρόπος μεταφοράς, αν ληφθεί υπόψη η παραγωγική της αξία. Για παράδειγμα, η τεράστια ποσότητα σιτηρών που απαιτείται για την παρασκευή του καθημερινού ψωμιού του κόσμου δεν μπορούσε να μεταφερθεί με άλλο τρόπο παρά μόνο με πλοίο. Ωστόσο δε θα μπορούσαμε να παραλείψουμε το ποσοστό των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων που έχουν σαν αποτέλεσμα την ρύπανση, όπου στην περίπτωση αυτή οδηγούν σε όζον στο επίπεδο του εδάφους ή αιθαλομίχλη και αναπνευστικά προβλήματα στους ανθρώπους σε παγκόσμιο επίπεδο και ειδικά σε ανθρώπους που μένουν κοντά σε λιμάνια τα οποία είναι επιβαρυμένα με ρύπους.

Παράλληλα, ένα άλλο παράδειγμα είναι οι πετρελαιοκηλίδες. Παρά τη συνολική μείωση του αριθμού των τυχαίων πετρελαιοκηλίδων σε σχέση με το παρελθόν, εξακολουθεί να υπάρχει η εμφάνιση πετρελαιοκηλίδων σε ακανόνιστα διαστήματα, ενώ οι απορρίψεις νερού ενός πλοίου μπορεί επίσης να είναι προβληματικές για τη θαλάσσια ζωή και το περιβάλλον. Τα φορτηγά πλοία απορρίπτουν νερό σεντίνας, μαύρο νερό, γκρίζο νερό κ.α Το γκρίζο νερό προέρχεται από τους χώρους διαμονής των πλοίων, συμπεριλαμβανομένου του νεροχύτη, του ντους, του πλυντηρίου και της κουζίνας. Το μαύρο νερό περιέχει ακαθαρσίες από την τουαλέτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος η οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστεί. (ΗΛΙΑΣ ΔΕΡΜΙΤΖΟΓΛΟΥ, 2023)

Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί ένα κύμα αυξανόμενης περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, λόγω της κλιματικής αλλαγής και της υπερ-εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων, με αποτέλεσμα να υπάρχει αναμονή αλλά και πίεση από τους εμπλεκόμενους φορείς της ναυτιλίας για ανάληψη ευθυνών και απαίτηση για εκτέλεση των δραστηριοτήτων τους με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον.

Ωστόσο για να επιτευχθεί η εφαρμογή των πράσινων τεχνικών και η πράσινη ναυτιλία είναι απαραίτητη η συνεισφορά πολλών διαφορετικών φορέων στην εφοδιαστική αλυσίδα, γεγονός όχι τόσο εύκολο μιας και τα συμφέροντα διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό. Αν όμως οι διαφορετικές απόψεις και τα συμφέροντα του καθενός δεν απομονωθούν ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί μια κοινή στρατηγική τότε το όλο εγχείρημα θα καταλήξει σε αποτυχία.

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που αναγκάζουν τις ναυτιλιακές εταιρείες να υιοθετήσουν πράσινη ναυτιλία είναι η απόδοση η οποία έχει οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες. Πιθανά κέρδη από την εφαρμογή των πράσινων ή περιβαλλοντικά βιώσιμων ενεργειών περιλαμβάνουν τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και επεξεργασίας αποβλήτων. Παραδείγματα περιβαλλοντικών τύπων σε επιδόσεις περιλαμβάνουν τις αυξήσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας και τα ποσοστά ανακύκλωσης πόρων. (Λάρδας, Παναγιώτης/Ιωάννης & Κουσαθανάς Αθανάσιος, 2017) Παράλληλα, το αυστηρότερο νομοθετικό πλαίσιο και πάλι δεν αφήνει πολλά περιθώρια για τις εταιρίες ώστε να φροντίσουν για την πράσινη ναυτιλία. Τόσο το CII που είναι ένας λειτουργικός δείκτης αλλά και άλλοι που αφορούν τα νεόκτιστα πλοία αλλά και άλλοι τοπικοί/εθνικοί κανονισμοί, καθιστούν αναγκαίο να λαμβάνονται μέτρα που έχουν ως αποτέλεσμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον πλοία αλλά και δραστηριότητες.

Γενικά οι τρόποι όπου η ναυτιλία συμβάλει στην «πράσινη» εικόνα είναι με τεχνικά, με αγορα-κεντρικά και λειτουργικά μέτρα. Τα τεχνικά μέτρα σχετίζονται με τον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής των πλοίων, στα λειτουργικά μέτρα υπάρχει συσχετισμός με τη διαδικασία λειτουργίας ενός πλοίου, ενώ τα αγορα-κεντρικά μέτρα (Market Based Measures – MBMs) βασίζονται στις αρχές που διέπουν την αγορά, έχουν κατά κύριο λόγο υποστηρικτικό χαρακτήρα στις αναφερόμενες ανωτέρω κατηγορίες μέτρων και διακρίνονται σε δυο μεγάλες επιμέρους κατηγορίες, το σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών (ETS) και σύστημα επιβολής φόρων. (ΜΠΑΧΑ ΜΑΡΙΑ, 2022)

Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και πράγματι ακολουθείται μια περιβαλλοντικά φιλική συμπεριφορά στον κλάδο της ναυτιλίας που είναι πλέον αισθητή και κάθε χρόνο όλο και περισσότερο.

Αυτό σε συνδυασμό με τους φιλόδοξους στόχους που έχουν θέσει ο ΙΜΟ και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, σχετικά με την απανθρακοποίηση, καθιστά απαραίτητη και την συνεισφορά των ΜΚΟ, των ναυλωτών, του δημοσίου τομέα και άλλων συμβαλλόμενων, οι οποίοι αυξάνουν τη ζήτηση για πράσινες υπηρεσίες συνεχώς. Έπειτα, σημαντικός είναι και ο ρόλος των οικονομικών και χρηματοοικονομικών ιδρυμάτων (OECD, The World Bank, Poseidon Principles, IFC) στα οποία έχει ασκηθεί πίεση ώστε να επενδύουν σε βιώσιμα Project. Τέλος, η αυξανόμενη ζήτηση από την πλευρά των επενδυτών για δείκτες κατατάξεις ESG είναι ένας ακόμη παράγοντας που ενισχύει την ανάγκη για βιώσιμες πολιτικές (Φαρμάκη Ευσταθία, 2023)

1.5 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

1.5.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

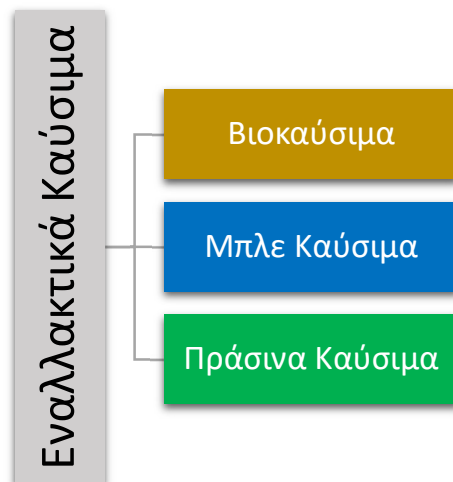
Μέχρι και πριν λίγο διάστημα η βασικότερη πηγή ενέργειας για την ναυτιλία ήταν το λεγόμενο βαρύ καύσιμο ή αλλιώς μαζούτ. Ωστόσο, οι στόχοι του IMO για το περιβάλλον και τους ρύπους και τις αέριες εκπομπές, έχουν αυξηθεί πολύ και δεν αφήνουν πολλά περιθώρια για συνέχιση της χρήσης του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ναυτιλιακές επιχειρήσεις να αναζητούν νέους τρόπους προκειμένου είτε να το αντικαταστήσουν είτε να βελτιώσουν την καύση του και με αυτόν τον τρόπο να εφαρμοστούν με τους κανονισμούς του IMO αναφορικά με την μείωση των ρύπων που προέρχονται από τα πλοία. Ωστόσο οφείλουμε να αναγνωρίσουμε ότι το βαρύ πετρέλαιο ή αλλιώς Heavy Fuel Oil, παραμένει ακόμη και σήμερα το κυρίαρχο καύσιμο της ναυτιλίας, ικανοποιώντας πάνω από το 80% της ζήτησης της βιομηχανίας. Παράλληλα, η μείωση των ταχυτήτων των πλοίων κατά 30% και η εφαρμογή όλων των διαθέσιμων μέτρων ενεργειακής αποδοτικότητας μπορεί να μειώσει τη ζήτηση ενέργειας του τομέα κατά 15-27% σύμφωνα με την μελέτη που έκανε ένας από τους σημαντικότερους κατασκευαστές κινητήρων (η WARTSILA) το 2024. Είναι ένα καλό ξεκίνημα όπως ανέφεραν, αλλά η ναυτιλία δεν μπορεί να επιτύχει τους φιλόδοξους στόχους του IMO χωρίς βιώσιμα καύσιμα.

Το παράρτημα VI της σύμβασης Marpol, που αναφέρεται στην πρόληψη της ρύπανση του περιβάλλοντος από τις αέριες εκπομπές από τα πλοία, τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005 και ένα αναθεωρημένο παράρτημα με σημαντικά ενισχυμένες απαιτήσεις εγκρίθηκε τον Οκτώβριο του 2008 και τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2010. Οι κανονισμοί για τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου εισήγαγαν ένα συνολικό όριο περιεκτικότητας σε θείο των καυσίμων των πλοίων, με αυστηρότερους περιορισμούς στις καθορισμένες περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs). Το παγκόσμιο όριο περιεκτικότητας σε θείο για τα ναυτιλιακά καύσιμα ήταν 3,50% m / m για αρκετά χρόνια ενώ το νέο παγκόσμιο όριο θα είναι 0,50% m/ m και τέθηκε σε ισχύ από την 1η Ιανουαρίου 2020 και μετά. (Χρήστος-Δημοσθένης, 2021) Αυτό ήταν το ονομαζόμενο Sulphur Cap 2020, σύμφωνα με το οποίο έγινε αλλαγή τους τύπους, τις ονομασίες και τα όρια του θείου των καυσίμων στη ναυτιλία με τους πλοιοκτήτες, ιδιοκτήτες πλοίων να πρέπει να αποφασίσουν πως θα ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις.

Σήμερα, πέρα από τις εναλλακτικές μορφές πετρελαίου που χρησιμοποιούν τα πλοία με σκοπό τον περιορισμό των οξειδίων του θείου στην ατμόσφαιρα υπάρχουν και εναλλακτικά καύσιμα είτε στην αγορά είτε υπό μελέτη εφαρμογής, όπως είναι το υδροποιημένο φυσικό αέριο, η μεθανόλη, η αμμωνία, το υδρογόνο κλπ. κάθε ένα από τα οποία έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και μπορεί να επιφέρει διαφορετικές συνέπειες (θετικές ή αρνητικές) προς το περιβάλλον. Η εμφάνιση νέων κανονισμών τόσο σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο (IMO), καθιστούν αναγκαία τη μείωση και άλλων αέριων εκπομπών όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα και γενικά τα αέρια του θερμοκηπίου γεγονός που από μόνο του το πετρέλαιο δεν μπορεί να επιτύχει.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η βιομηχανία θα δει μια αργή μετάβαση μακριά από ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα όπως το υδροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), το οποίο τα πλοία θα μπορούσαν να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν έως το 2050, προς πιο βιώσιμα συνθετικά καύσιμα (e-fuels). Θα μπορούσαμε να διαχωρίσουμε τα εναλλακτικά καύσιμα σε τρεις γενικές κατηγορίες. Τα βιοκαύσιμα, τα μπλε καύσιμα (μεταβατικά καύσιμα) και τα πράσινα καύσιμα.

Διάγραμμα 9: Κατηγοριοποίηση Εναλλακτικών Καυσίμων



Τα βιοκαύσιμα, παράγονται από μη-καταναλώσιμες καλλιέργειες ή φυσικά προϊόντα όπως ξύλο, ή γεωργικά υπολείμματα - τα βιοκαύσιμα είναι τα πρώτα καύσιμα που είναι διαθέσιμα, με μεγάλη αναμενόμενη ανάπτυξη να αναμένεται μέχρι και το 2030. Αυτό περιλαμβάνει βιοκαύσιμα παρόμοια με ντίζελ, βιομεθανόλη και βιομεθάνιο, αλλά επίσης και βιοαιθανόλη, η οποία παράγεται ήδη σε σημαντικές ποσότητες, ειδικά στη Βραζιλία, τις ΗΠΑ και την ΕΕ. Για να είναι αυτά τα καύσιμα βιώσιμα πρέπει να

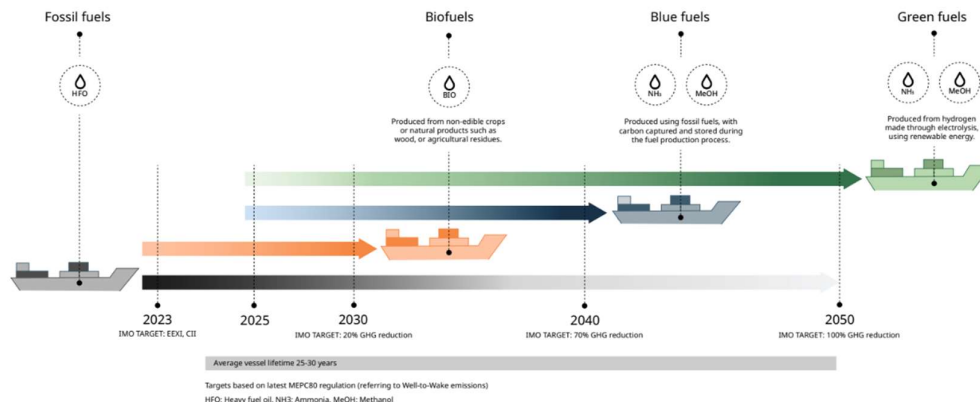
χρησιμοποιούν βιώσιμες πρώτες ύλες όπως απόβλητα λίπη, έλαια και γράσα, που δεν μειώνουν την ασφάλεια τροφίμων και τη διαθεσιμότητα γης. Η πράσινη μεθανόλη έχει εμφανιστεί ως ένας πρώιμος ηγέτης. Οι κινητήρες μεθανόλης είναι μια αποδεδειγμένη τεχνολογία και τα πλοία μπορούν να λειτουργούν με βιομεθανόλη και ανανεώσιμη ηλεκτρική μεθανόλη χρησιμοποιώντας διαθέσιμη τεχνολογία, ενώ το καύσιμο μειώνει σημαντικά τις εκπομπές σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα (Holm Roger, 2024).

Η επόμενη φάση θα είναι τα "μεταβατικά καύσιμα" όπως η "μπλε" αμμωνία λόγω της απλούστερης επεκτασιμότητας σε σύγκριση με τα πράσινα καύσιμα μηδενικού άνθρα. Είναι πιο απλά στην κλιμάκωση σε σύγκριση με τα συνθετικά καύσιμα και θα υποστηριχθούν από την υποδομή και τους πόρους της πετρελαϊκής και αερίου βιομηχανίας.

Από την άλλη η ανάλυση της αγοράς μας δείχνει ότι τα πράσινα συνθετικά καύσιμα θα γίνουν πιο ευρέως διαθέσιμα προς τα τέλη της δεκαετίας του 2030 ή στις αρχές της δεκαετίας του 2040. Αυτά παράγονται από υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, επομένως είναι πιθανόν να παράγονται κυρίως σε τοποθεσίες με υψηλό δυναμικό και χώρο για ηλιακή και αιολική ενέργεια (Holm Roger, 2024).

Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει μια εικόνα χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων για τα επόμενα χρόνια με τα πράσινα καύσιμα να μπαίνουν για τα καλά στη ζωή μας από το 2040 και μετά.

Εικόνα 7: Χρονοδιάγραμμα εναλλακτικών Καυσίμων



Πηγή: WARTSILA Report 2024

Ένα καύσιμο, ανεξάρτητα από τον τύπο του θα πρέπει να αξιολογείται συνολικά. Ο κύκλος ζωής τις ναυτιλιακού καυσίμου μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις: από την

πηγή στη δεξαμενή (well-to-tank – WTT) και από τη δεξαμενή στην πρόωση του πλοίου (tank-to-wake – TTW). Η φάση WTT περιλαμβάνει τις δραστηριότητες παραγωγής του καυσίμου, εξόρυξης και μεταφοράς των πρώτων υλών καθώς και την παραγωγή και διανομή του καυσίμου. Η φάση TTW περιλαμβάνει τις εκπομπές καύσης του καυσίμου κατά τη χρήση του σε ένα πλοίο. Το άθροισμα των εκπομπών από τις δύο φάσεις χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η «ανθρακική ένταση» του καυσίμου, η οποία αντιπροσωπεύει τις εκπομπές του ανά μονάδα παραδοθείσας ενέργειας καυσίμου και άρα ο αριθμός που αξιολογείται τεχνο-οικονομικά μπορεί να μας δείξει αν ένα καύσιμο και το πλοίο που το καίει συμβάλουν και πετυχαίνουν τους στόχους του IMO και της ΕΕ για μια βιώσιμη και πράσινη ναυτιλία.

Διαφορετικά καύσιμα έχουν διαφορετικές εκπομπές CO₂, SO_x, NO_x και μεθανίου και τα περισσότερο αναποτελεσματικά πλοία (δηλαδή τα παλαιότερης τεχνολογίας και κατασκευής πλοία – γάστρα και μηχανή) χρησιμοποιούν συνήθως περισσότερο καύσιμο. Σύμφωνα με μελέτες του 2015 από το ποσό της παγκόσμιας κατανάλωσης θαλάσσιου καυσίμου, το 72% ήταν υπολειμματικά καύσιμα (π.χ. βαρύ μαζούτ, HFO), το 26% αποστάγματα (π.χ. πετρέλαιο ντίζελ) και μόλις το 2% υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Σήμερα το ποσοστό του LNG έχει φτάσει το 5-10% και το 1-2% ανήκει στα βιοκαύσιμα, ενώ καθώς τα χρόνια περνάνε τόσο οι αριθμοί αυτοί αυξάνονται και η χρήση του πετρελαίου (HFO/LFO) μειώνεται αισθητά.

Σε οποιαδήποτε περίπτωση η επιλογή καθενός από αυτά τα καύσιμα δεν είναι εύκολη και τα κριτήρια αξιολόγησης και επιλογής ποικίλουν.

Ένα πρώτο κριτήριο αξιολόγησης των εναλλακτικών καυσίμων είναι οι τιμές τους. Οι τιμές καυσίμων ποικίλλουν για κάθε γεωγραφική ζώνη, φορολογικά καθεστώτα, συντελεστές χωρητικότητας (π.χ. για ηλιακή φωτοβολταϊκή και αιολική χωρητικότητα), ένταση εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικά χαρακτηριστικά για κάθε χώρα. Η τιμή του καυσίμου κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου είναι συχνά ο πιο σχετικός παράγοντας επιχειρηματικής επένδυσης. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμολόγηση των καυσίμων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των συνθηκών της αγοράς, που είναι δύσκολο ή αδύνατο να προβλεφθούν και δεν είναι σταθερή.

Παράλληλα ένας άλλος παράγοντας για την επιλογή του εναλλακτικού καυσίμου ή την απόφαση ενός πλοιοκτήτη να προχωρήσει στη ναυπήγηση πλοίων που θα καίνε

εναλλακτικά καύσιμα είναι η διαθεσιμότητα και η υποδομή για τα καύσιμα αυτά σε συνδυασμό με τις διαδρομές και πλόες που εκτελεί το εκάστοτε πλοίο ή πρόκειται να εκτελεί. Η διαθεσιμότητα εναλλακτικών καυσίμων ποικίλλει ανά περιοχή. Είναι σημαντικό να αξιολογηθεί εάν το επιλεγμένο καύσιμο είναι εύκολα προσβάσιμο σε λιμάνια κατά μήκος των διαδρομών του πλοίου. Επιπλέον, σε συνδυασμό με την διαθεσιμότητα του καυσίμου είναι και η υποδομή για αυτό. Η υπάρχουσα υποδομή για την αποθήκευση, το χειρισμό και τη διανομή καυσίμων είναι κρίσιμος παράγοντας για την επιλογή αυτού.

Επιπλέον ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη έχει να κάνει με την ικανότητα ενός πλοίου να καταναλώνει ένα εναλλακτικό καύσιμο. Πέρα των νέων ναυπηγήσεων όπου και ορίζεται εκ των προτέρων το είδος του καυσίμου που πρόκειται να καταναλώνει ένα πλοίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σήμερα υπάρχουν διαθέσιμα τουλάχιστον 56000 πλοία πάνω από 5000 κόρους χωρητικότητας τα περισσότερα από τα οποία καίνε μαζούτ. Το ερώτημα εδώ είναι εάν οι κινητήρες των πλοίων αυτών μπορούν να λειτουργούν με το επιλεγμένο εναλλακτικό καύσιμο χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις ή εάν απαιτούνται εκ των υστέρων τροποποιήσεις είτε στις δεξαμενές, είτε στα συστήματα σωληνώσεων και αντηλιών για την χρησιμοποίηση αυτού. Η συμβατότητα με υφιστάμενους κινητήρες και των συστημάτων/μηχανημάτων επί του πλοίου επηρεάζει τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας της μετάβασης σε εναλλακτικά καύσιμα καθώς όπως είναι κατανοητό μια τέτοια σειρά τροποποιήσεων θα ήταν μια υψηλή επένδυση για την εταιρία. Επιπλέον το κόστος επένδυσης για τη μετατροπή ενός πλοίου σε πλοίο που θα έχει την απαραίτητη αρχιτεκτονική για να καταναλώσει το εκάστοτε εναλλακτικό καύσιμο είναι από μόνο του ένας παράγοντας που οφείλει η εταιρία να συνυπολογίσει.

Στη συνέχεια άξιος παράγοντας αναφοράς είναι και η διαχείριση ασφάλειας και εκάστοτε κινδύνου. Όπως και το πετρέλαιο έτσι και τα εναλλακτικά καύσιμα έχουν θετικά αλλά και αρνητικά χαρακτηριστικά, τα δεύτερα από τα οποία θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο τους ανθρώπους πάνω στο πλοίο σε περίπτωση που κάτι πάει στραβά κατά τη διαχείριση αυτού. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να αξιολογηθεί το προφίλ ασφάλειας των εναλλακτικών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του χειρισμού, της αποθήκευσης, της μεταφοράς και της χρήσης επί του σκάφους πριν την επιλογή αυτού. Πιθανοί κίνδυνοι είναι η ευφλεκτότητα, η τοξικότητα και η

συμβατότητα με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα ασφαλείας και τις διαδικασίες αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης.

Τέλος δε θα μπορούσαμε να παραλείψουμε τον παράγοντα της τεχνικής σκοπιμότητα και απόδοση αλλά και την υποστήριξη αυτών από τον ανθρώπινο παράγοντα. Έτσι σε κάθε περίπτωση επιλογής του καυσίμου θα πρέπει να αξιολογηθεί τόσο η αξιοπιστία όσο και οι απαιτήσεις συντήρησης του κινητήρα. Για να γίνει αυτό όμως δεν μπορεί να λείπει ο ανθρώπινος παράγοντας. Η σωστή συντήρηση αλλά και χρήση των καυσίμων αυτών επί του πλοίου απαιτεί πληρώματα που μπορούν να ανταπεξέλθουν στην διεξαγωγή ενδεδειγμένων δοκιμών και ελέγχων αλλά και σωστών συντηρήσεων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του πλοίου. Άρα το ερώτημα εδώ που προκύπτει είναι: «Αν θεωρήσουμε ότι το οικονομικό ζήτημα αλλά και το ζήτημα προσφοράς και διάθεσης των εναλλακτικών καυσίμων έχει λυθεί, υπάρχει η ανθρώπινη δυναμική ώστε να καλύψει τις ανάγκες χρήσης αυτών; Και αν ναι σε τι βαθμό και πόση εκπαίδευση απαιτείται ώστε να είναι σε θέση τα πληρώματα να καλύψουν τις ανάγκες αυτές;»

Κεφάλαιο 2ο: ΜΕΘΑΝΟΛΗ & ΠΡΑΣΙΝΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΚΑΤΗΡΙΣΤΙΚΑ & ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ

Η μεθανόλη, επίσης γνωστή ως μεθυλική αλκοόλη ή ξυλόπνευμα, είναι μια χημική ουσία με τον τύπο CH_3OH . Η παλαιά της ονομασία ήταν «ξυλόπνευμα» το οποίο προέκυψε από την διαδικασία παραγωγής της η οποία γινόταν από παραπροϊόν της ξηρής απόσταξης ξύλου. Πλέον, η μεθανόλη που παράγεται σήμερα είτε με την χρήση φυσικού αερίου ως βασική πρώτη ύλη, είτε από την καταλυτική υδρογόνωση ενός ρεύματος αποβλήτων CO_2 ή από βιομάζα. Χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των πετροχημικών ως πρώτη ύλη για την παραγωγή άλλων χημικών, κυρίως φορμαλδεϋδης και οξικού οξέος.

Η μεθανόλη αποτελεί την απλούστερη μορφή αλκοόλης και στις κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (σε θερμοκρασία 25°C και υπό πίεση 1 atm) είναι ένα ελαφρύ, άχρωμο, εύφλεκτο και πάρα πολύ τοξικό υγρό με έντονη οσμή. Παράλληλα, πρόκειται για αλκοόλη που παγώνει στους $-97,6^\circ\text{C}$, βράζει στους $64,6^\circ\text{C}$ και έχει πυκνότητα 0,791 κιλά ανά κυβικό μέτρο στους 20°C . Η μεθανόλη είναι σημαντική οργανική πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία, με την παγκόσμια ετήσια ζήτηση να διπλασιάζεται σχεδόν τα τελευταία δέκα χρόνια, φτάνοντας περίπου τις 98 εκατομμύρια τόνους το 2019.

Την μεθανόλη την συναντάμε στην καθημερινότητά μας με τη μορφή πλαστικών, σε χρώματα, καλλυντικά και φυσικά σε καύσιμα. Επίσης χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας στην ναυτιλία, την αυτοκινητοβιομηχανία και στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας και είναι ένας αναπτυσσόμενος ανανεώσιμος πόρος ενέργειας.

Πλέον η μεθανόλη παράγεται κυρίως βιομηχανικά από μονοξειδίο του άνθρακα, διοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο. Αντίστοιχα και με το υδρογόνο, έτσι και σε στην περίπτωση της μεθανόλης η ανώτερη αλυσίδα εφοδιασμού της μεθανόλης διακρίνει 4 διαφορετικούς τρόπους παραγωγής: **τη γκρίζα μεθανόλη** (από ορυκτές πηγές), **τη βιομεθανόλη** (από βιοαέριο), **τη μεθανόλη ανακύκλωσης άνθρακα** (carbon-recycled methanol) και την **ηλεκτρομεθανόλη** (από πράσινο υδρογόνο και πηγή άνθρακα). Εναλλακτικός τρόπος διαχωρισμού της μεθανόλης είναι η **καφέ** (παράγεται από άνθρακα-ορυκτές πηγές), η **γκρι** (παράγεται από φυσικό αέριο), η **μπλε** (παράγεται από φυσικό αέριο με τη χρήση κατάλληλης τεχνολογίας για αποθήκευση του άνθρακα) και η **πράσινη μεθανόλη** (παράγεται από πράσινο υδρογόνο, ηλεκτρική ενέργεια, ή από

βιομαζα). Σε αυτή την κατηγοριοποίηση η **βιο-μεθανόλη και η e-μεθανόλη** εσωκλείονται στην κατηγορία πράσινη μεθανόλη. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα σε αυτή την δεύτερη κατηγοριοποίηση την βιομεθανόλη μπορεί να την εντοπίσουμε στην βιβλιογραφία και ως «**πορτοκαλί**» αντί για πράσινη ώστε να διαφοροποιείται από την μεθανόλη που παράγεται μέσω ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τόσο την πηγή παραγωγής του κάθε είδους αλλά και την περιβαλλοντική σκοπιά αυτού.

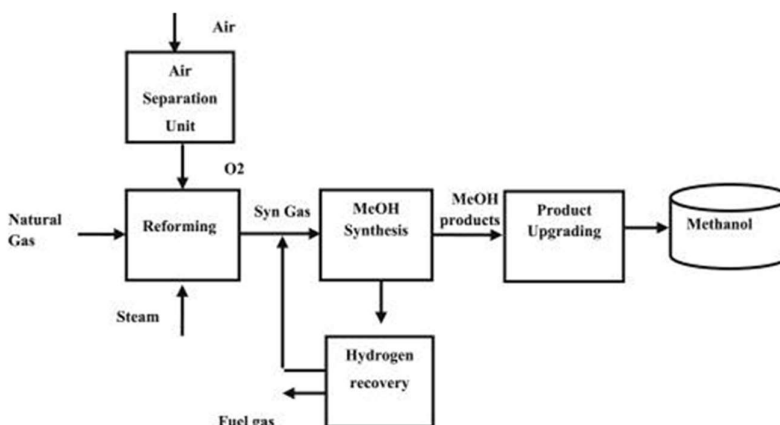
Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση Μεθανόλης

| Name | Source | Environmental aspect |
|-----------------------|---|--|
| Brown methanol | Coal | High well-to-tank CO ₂ emissions |
| Grey methanol | Natural gas | High well-to-tank CO ₂ emissions |
| Blue methanol | Blue hydrogen in combination with captured carbon dioxide | Significantly lower CO ₂ emissions |
| Green methanol | | Considered to reach carbon neutrality |
| | Bio-methanol | Biomass |
| | E-methanol | Green hydrogen, captured CO ₂ and renewable electricity |

Πηγή: A Sustainable Methanol Ship Fuel Supply Chain for the Maritime Industry: Developing a Framework through a Systematic Literature Review (Olufsen, 2023)

Αναλύοντας λίγο περισσότερο τα είδη της μεθανόλης, θα λέγαμε ότι η συμβατική μεθανόλη είναι αυτή που παράγεται κυρίως από φυσικό αέριο και άνθρακα (καφέ και γκρι). Η διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνει την αεριοποίηση του φυσικού αερίου ή του άνθρακα για τη δημιουργία συνθετικού αερίου (syngas), που είναι ένα μείγμα μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και υδρογόνου (H₂). Αυτό το συνθετικό αέριο στη συνέχεια υφίσταται μια χημική αντίδραση, γνωστή ως σύνθεση μεθανόλης, για την παραγωγή μεθανόλης (CH₃OH). Άρα τα στάδια που απαρτίζουν όλη αυτή τη διαδικασία είναι ο καθαρισμός της τροφοδοσίας που στη περίπτωση μας είναι το φυσικό αέριο ή ο άνθρακας, η δημιουργία του syngas, η σύνθεση της μεθανόλης και ο καθαρισμός της. Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει την παραγωγή της συμβατικής μεθανόλης

Διάγραμμα 10: Παραγωγή Συμβατικής μεθανόλης (καφέ ή γκρι)



Πηγή: (ΕΛΙΣΑΒΕΤ, 2022)

Το σημαντικότερο ίσως από όλα τα στάδια είναι ο καθαρισμός του φυσικού αερίου ή άνθρακα. Είναι σημαντικό να αφαιρεθεί από αυτό το θείο S προκειμένου να μη δηλητηριαστούν, και κατ' επέκταση απενεργοποιηθούν, οι καταλύτες που θα αναφερθούν στα παρακάτω στάδια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας διεργασίας που ονομάζεται υδρογονοαποθείωση (hydrodesulfurization). Συνοπτικά, αυτή η διεργασία χαρακτηρίζεται από προσθήκη υδρογόνου το οποίο προκαλεί διάσπαση του δεσμού μεταξύ άνθρακα και θείου. Από εκεί και πέρα οι διαδικασίες που μπορούν να ακολουθηθούν για την παραγωγή του Syngas και στη συνέχεια της μεθανόλης είναι η αναμόρφωση με ατμό, η μερική οξειδωση, η αυτόθερμη αναμόρφωση, η ξηρή αναμόρφωση και η συνδυαστική αναμόρφωση. (Κασιμάτης Ανδρέας, 2021)

Σε σύγκριση με τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα όπως το βαρύ καύσιμο πετρέλαιο (HFO), η συμβατική μεθανόλη έχει χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Παρόλα αυτά, παραμένει βασισμένη σε ορυκτά καύσιμα, και συνεπώς δεν είναι εντελώς ουδέτερη ως προς τον άνθρακα. Η συμβατική μεθανόλη είναι ευρέως διαθέσιμη και χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα στη χημική βιομηχανία. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν ήδη ανεπτυγμένα δίκτυα παραγωγής και διανομής για τη μεθανόλη.

Όσον αφορά τη χρήση της συμβατικής μεθανόλης ως ναυτιλιακό καύσιμο έχει αυξηθεί λόγω των ελκυστικών περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της. Πλοία που καίνε μεθανόλη εκπέμπουν λιγότερα οξειδία του θείου (SO_x), οξειδία του αζώτου (NO_x), και σωματίδια σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα. Αυτό βοηθά στη συμμόρφωση με τους αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς όπως είναι αυτοί

που έθεσε ο IMO το 2020 αναφορικά με τον περιορισμό στην περιεκτικότητα σε θείο στα ναυτιλιακά καύσιμα αλλά και άλλοι σε επίπεδο Ευρωπαϊκό (FuelEU, ETS κ.α.) πιο πρόσφατα. Σύμφωνα με μελέτη του Νορβηγικού Νηογνώμονα (DNV) το 2021 λειτουργούν ήδη 30 πλοία με καύσιμο τη συμβατική μεθανόλη, ενώ σε ένα χρόνο αυτά διπλασιάστηκαν και ο αριθμός τους φτάνει στα 62 το 2022, ενώ πολλά άλλα βρίσκονταν υπό κατασκευή.

Από την άλλη στο πλαίσιο παραγωγής συμβατικής μεθανόλης είναι και η παραγωγή της μεθανόλης μέσω γαιάνθρακα που παρατηρείται σε χώρες όπου διαθέτουν μεγάλες πηγές της εν λόγω πρώτης ύλης, όπως είναι η Κίνα. Τα στάδια που απαρτίζουν τη παραγωγική διαδικασία είναι και πάλι η αεριοποίηση (gasification), ο καθαρισμός του syngas που παράγεται (purification), η σύνθεση και ο καθαρισμός της μεθανόλης. Τα δύο τελευταία στάδια είναι παρόμοια με αυτά της συμβατικής μεθανόλης. Το πρώτο κομμάτι του καθαρισμού και αεριοποίησης διαφέρει γιατί πρόκειται για διαφορετική πρώτη ύλη. Η αεριοποίηση πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες της τάξεως των 800°C με 1350°C και πιέσεων μεταξύ 20 bar και 25 bar, ενώ συνήθως χρησιμοποιούνται καταλύτες αλάτων αλκαλίων όπως το κάλιο και το νάτριο. (Κασιμάτης Ανδρέας, 2021)

Το syngas στη προκειμένη περίπτωση, που παράγεται από πηγές γαιάνθρακα, περιέχει ένα μεγάλο αριθμό από ακαθαρσίες όπως είναι η αμμωνία, θειούχες ενώσεις, κυανιούχες ενώσεις καθώς και σκόνη. Ο καθαρισμός εδώ μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, με τον πιο διαδεδομένο να είναι η μέθοδος *Rectisol*, στην οποία χρησιμοποιείται μεθανόλη, σε χαμηλές θερμοκρασίες, ως διαλύτης και διαχωρίζει τους ρύπους από το υπόλοιπο syngas.

Παρά τα πλεονεκτήματά της η συμβατική μεθανόλη, επειδή προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, εξακολουθεί να συμβάλει στις εκπομπές CO₂. Ως εκ τούτου, η ναυτιλιακή βιομηχανία εξετάζει όλο και περισσότερο εναλλακτικές λύσεις όπως η ανανεώσιμη μεθανόλη (βιο-μεθανόλη) και η ηλεκτρο-μεθανόλη (e-methanol), δηλαδή την πράσινη μεθανόλη για να επιτύχει πιο βιώσιμους στόχους.

Έτσι, ένας άλλος τρόπος παραγωγής της μεθανόλης, πιο σύγχρονος, είναι με τη χρήση βιομάζας (πορτοκαλί μεθανόλη ή και πράσινη όπως την αναφέρουν ορισμένες βιβλιογραφικές πηγές). Πηγές βιομάζας αποτελούν προϊόντα που προέρχονται από τη γεωργία, τη κτηνοτροφία, τη δασοκομία, τις υδατοκαλλιέργειες και τα αστικά απόβλητα. Κύριο πλεονέκτημα της βιομάζας είναι η ο ουδέτερος κύκλος του άνθρακα.

Ουσιαστικά, δηλαδή, το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από την καύση είναι το ίδιο με εκείνο που καταναλώνεται κατά τη φωτοσύνθεση με αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα. Στο πρώτο στάδιο παραγωγής της μεθανόλης από βιομάζα μειώνεται η υγρασία και η βιομάζα αποκτά ομοιόμορφο σχήμα. Στη συνέχεια ακολουθεί η αεριοποίηση σε δύο φάσεις, η παραγωγή του syngas και ο καθαρισμός του προϊόντος. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ του syngas που παράγεται από βιομάζα με το αντίστοιχο που παράγεται από γαιάνθρακα είναι ότι στο πρώτο παρατηρούνται μικρότερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων καθώς και μείωση της συγκέντρωσης θείου που φτάνει σε επίπεδα κάτω του 0,2% κατά βάρος.

Οι βασικές χρήσεις αυτής της μεθανόλης είναι κυρίως για την παραγωγή άλλων χημικών, όπως, για παράδειγμα, πρόσθετα της βενζίνης, διαλύτες και αντιψυκτικά, ή στην διαδικασία παραγωγής βιοντήζελ. Ένα από τα μειονεκτήματά είναι το ιδιαίτερα υψηλό κόστος παραγωγής της, έως και τέσσερις (4) φορές μεγαλύτερο από αυτό της βενζίνης. Είναι κατανοητό ότι ενώ ως βιοκαύσιμο ενδιαφέρει την ναυτιλία, το κόστος απόκτησης της, σύμφωνα με ορισμένες μελέτες εκμηδενίζει προς στιγμήν κάθε σκέψη για εκμετάλλευσή της πέρα από επιστημονικούς και ερευνητικούς σκοπούς. (Αγγελίδης, 2022). Μάλιστα αυτό επιβεβαιώθηκε ήδη από το 2021 και από τον κύριο Claes Berglund (President of European Community Shipowners' Association (ECSA)) που ανέφερε ότι *«η βιομάζα είναι πιο ακριβή σε σχέση με το φυσικό αέριο για την παραγωγή της μεθανόλης και αν κάποιος μπορεί να μας την παρέχει στην ίδια τιμή τότε φυσικά και ενδιαφερόμαστε»* (Ζέρβος Γεώργιος, 2021).

Στη σημερινή εποχή ωστόσο για την επίτευξη των στόχων αερίων του θερμοκηπίου, η μετάβαση σε πράσινα άνθρακο-ουδέτερα καύσιμα όπως η βιομεθανόλη και η ηλεκτρομεθανόλη είναι ιδιαίτερα επιθυμητή. Ωστόσο, η τρέχουσα μετάβαση στη θαλάσσια μεταφορά με βάση τη μεθανόλη μπορεί να απαιτήσει τη χρήση γκρίζας μεθανόλης ως λύσεις μεσοπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης χρονικής προοπτικής, καθώς και μείγματα ορυκτής και ανανεώσιμης μεθανόλης (Gerwin Zomer, 2020).

Για την παραγωγή πράσινης μεθανόλης, χρησιμοποιείται ενέργεια μόνο από ανανεώσιμες πηγές. Συνήθως γίνεται μέσω αεριοποίησης πηγών βιομάζας και ονομάζεται βιο-μεθανόλη. Ενδιαφέρον έχει και η e-μεθανόλη, η οποία πρόκειται για μεθανόλη παραγόμενη από πράσινο υδρογόνο και δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα. Η ηλεκτρομεθανόλη είναι η πιο ακριβή έκδοση της μεθανόλης, πιο ακριβή και από τη βιομεθανόλη, αλλά πιθανώς να γίνει φθηνότερη στο μέλλον, καθώς οι δαπάνες για τις

ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το πράσινο υδρογόνο από τα οποία και προέρχεται μειώνονται. Το διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπεται κατά την καύση της ηλεκτρομεθανόλης, αλλά εάν προέρχεται από βιογενές CO₂, η ηλεκτρομεθανόλη θεωρείται γενικά ως άνθρακας ανεκτού αντικτύπου σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της. Περισσότερη ανάλυση για τα δύο αυτά είδη μεθανόλης παρατίθενται σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου αυτού.

Παράλληλα αξίζει να αναφερθεί ότι η μεθανόλη είναι διαθέσιμη σε πάνω από 120 λιμάνια παγκοσμίως και αποστέλλεται παγκοσμίως. Μέχρι και το 2023 είχαν καταγραφεί περισσότερες από 90 μονάδες παραγωγής μεθανόλης σε όλο τον κόσμο με συνολική παραγωγική ικανότητα περίπου 120 εκατομμυρίων τόνων, πλήρως ικανές να καλύψουν τη σημερινή ζήτηση περίπου 100 εκατομμυρίων τόνων μεθανόλης. Μόλις παραχθεί, περίπου το ένα τρίτο της μεθανόλης αυτής αποστέλλεται και εμπορεύεται παγκοσμίως ως βιομηχανικό εμπόρευμα, με το μεγαλύτερο μέρος της μεθανόλης να καταναλώνεται εντός των συνόρων ή να μεταφέρεται σε γειτονικές αγορές και κέντρα μέσω ξηράς (Marquez Carlos, 2023)

2.2. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗ

Διάφορες ανησυχίες έχουν δημιουργηθεί σχετικά με τη χρήση μεθανόλης στα καύσιμα μεταφοράς κατά τη διάρκεια των ετών, οι οποίες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Διάβρωση και συμβατότητα μη υλικών.
- Αποθήκευση
- Εκπομπές/Εξάτμιση
- Ενεργειακό περιεχόμενο
- Κίνδυνοι πυρκαγιάς
- Τοξικότητα και άλλα

Πολλοί από αυτούς τους προβληματισμούς έχουν μετατραπεί σε αντιρρήσεις στη χρήση μεθανόλης σε οποιαδήποτε εφαρμογή καυσίμου, αλλά και οδηγεί σε διαχωρισμό αυτής σε μεθανόλη υψηλού, μεσαίου και χαμηλού επιπέδου (κινδύνου).

Αρχικά ένας προβληματισμός που γεννάται από την χρήση της μεθανόλης επί του πλοίου είναι η αποθήκευσή της. Η ασφαλής αποθήκευση, ο χειρισμός και η χρήση της μεθανόλης στο πλοίο απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω ασφαλείας (safety). Το ογκομετρικό ενεργειακό περιεχόμενο είναι σημαντικό για το σχεδιασμό του συστήματος έγχυσης καυσίμου και την αποθήκευση καυσίμου. Η υψηλότερη

πυκνότητα της μεθανόλης αντισταθμίζεται περισσότερο από μια τιμή θέρμανσης μικρότερη από το μισό της βενζίνης και κατά συνέπεια οι διάρκειες εγχύσεις πρέπει να είναι διπλάσιες για να εισαχθεί η ίδια ενέργεια στον κινητήρα. Αυτό σημαίνει επίσης ότι χρειάζονται μεγαλύτερες δεξαμενές. Με άλλα λόγια για μια συγκεκριμένη ποσότητα πετρελαίου απαιτείται μια διπλάσια της συγκριμένης ποσότητας σε μεθανόλη για την ίδια ανάγκη.

Παράλληλα, το ιξώδες της μεθανόλης είναι χαμηλότερο από αυτό του ντίζελ (MDO) κατά περίπου 20 φορές και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη πιθανότητα διαρροών σε αντλίες καυσίμου (Shipowners, 2021).

Επιπλέον, το μεθυλικό αλκοόλ που περιέχει η μεθανόλη είναι τοξικό για τους ανθρώπους όταν καταναλώνεται, απορροφηθεί μέσω του δέρματος ή εισπνευστεί σε υψηλές συγκεντρώσεις. Παράλληλα, η έκθεση του ανθρώπου σε μεθανόλη μπορεί να προκαλέσει τύφλωση, ανεπάρκεια νεφρών και, εάν η δόση είναι αρκετά υψηλή ή η έκθεση επιμηκυνθεί, τότε οδηγεί σε θάνατο. Η κατανάλωση ελάχιστης ποσότητας μεθανόλης μπορεί να προκαλέσει κρίσιμη ζημιά στον οπτικό νεύρο ενώ η μέση θανατηφόρα δόση είναι σίγουρα περισσότερη. (Holm Roger, 2024). Η δηλητηρίαση από μεθανόλη μπορεί να αντιμετωπιστεί με αντίδοτο όπως η αιθανόλη. Η αιμοκάθαρση ή η αιμοδιαλυτική διήθηση μπορεί να είναι απαραίτητη για την αφαίρεση της μεθανόλης και των τοξικών παραπροϊόντων της από το αίμα.

Τα χαρακτηριστικά της τοξικότητας της μεθανόλης σε συνδυασμό με τις ιδιότητές της για ευφλεκτότητα/εκρηκτικότητα αποτελούν προκλήσεις και στις τεχνικές εντοπισμού πυρκαγιών και κατασβέσεων. Ως άχρωμο υγρό με φλόγα που είναι δύσκολο να δει κανείς, δημιουργεί δυσκολία και σημαντικό εμπόδιο ώστε να αναπτυχθούν εργαλεία ευκολίας χρήσης θερμικής εικονογράφησης για οπτικοποίησης της φωτιάς. Αυτό συνδέεται με έναν άλλο παράγοντα που είναι ότι η μεθανόλη έχει χαμηλό σημείο αναφλεξιμότητας (12 °C). Αυτό σημαίνει ότι οι 12 °C είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία οι ατμοί εκπέμπονται από τη μεθανόλη σε επαρκή ποσότητα για να σχηματίσουν μια αναφλεξιμότητα (ατμός-αέριο). Η μεθανόλη καίγεται σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και η φλόγα της είναι σχεδόν αόρατη κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τέλος, το μοριακό βάρος της μεθανόλης (32 γραμμάρια ανά μολ) είναι ελαφρώς υψηλότερο από αυτό του αέρα (28 γραμμάρια ανά μολ), με αποτέλεσμα οι ατμοί

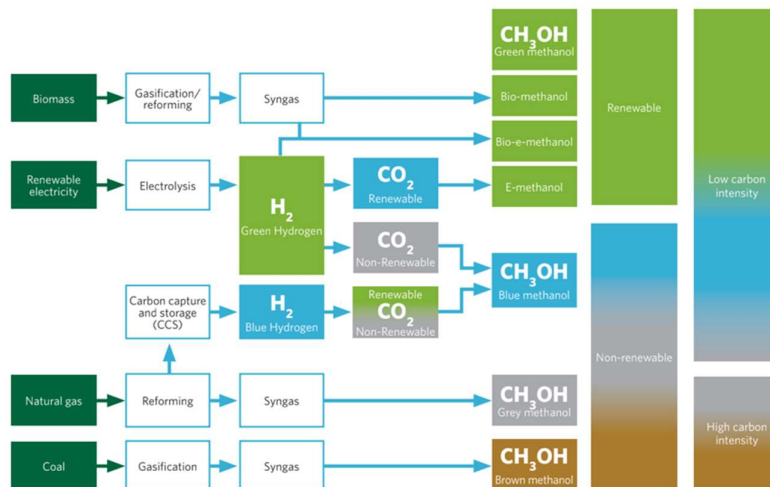
μεθανόλης να τείνουν να συγκεντρώνονται κοντά στο έδαφος, ενώ παράλληλα η μεθανόλη δεν διασπάται σε κλειστούς μη αεριζόμενους χώρους.

Αυτά τα χαρακτηριστικά απαιτούν συγκεκριμένα μέτρα ασφαλείας που εμποδίζουν τη δημιουργία ατμών μεθανόλης και την εγκατάσταση κατάλληλου αερισμού, ανιχνευτών διαρροών, ανιχνευτών θερμότητας και εξοπλισμού πυροσβεστικής.

2.3 ΠΡΑΣΙΝΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Αναφορικά με την παραγωγή της Μεθανόλης και της πράσινης μεθανόλης, οι σύγχρονες εγκαταστάσεις σήμερα παράγουν μεθανόλη με εκτιμώμενο αποτύπωμα άνθρακα περίπου 110 gCO₂ eq/MJ, το οποίο είναι υψηλότερο από αυτό που ίσχυε πριν από δύο δεκαετίες (περίπου 97 gCO₂ eq/MJ), πιθανώς επειδή η κατανόηση στην καταμέτρηση του άνθρακα έχει βελτιωθεί με πιο πρόσφατα δεδομένα. Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει τους τρόπους με τους οποίους μπορούν να παραχθούν τα διάφορα είδη μεθανόλης.

Διάγραμμα 11: Παραγωγή διαφόρων ειδών Μεθανόλης



Source: IRENA and Methanol Institute, 2021

Πιο ελκυστική για χρήση στα πλοία είναι η πράσινη μεθανόλη (e-methanol & bio-methanol) ενώ η ορυκτή μεθανόλη παράγεται από φυσικό αέριο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η διεργασία της παραγωγής ορυκτής μεθανόλης από ορυκτό φυσικό αέριο σε επίπεδο κύκλου ζωής έχει μεγαλύτερες εκπομπές CO₂ από ότι έχει η αντίστοιχη διεργασία της πράσινης μεθανόλης. Η παραγωγή της πράσινης μεθανόλης είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σχέση με την διεργασία παραγωγής ορυκτής μεθανόλης. Όμως το κόστος παραγωγής πράσινης μεθανόλης είναι μεγαλύτερο από το κόστος

παραγωγής της ορυκτής μεθανόλης. Συγκεκριμένα, το κόστος της e-μεθανόλης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος του υδρογόνου και του CO₂ και με τη σειρά του το κόστος του CO₂ εξαρτάται από την πηγή από την οποία συλλέγεται, π.χ. από τη βιομάζα, βιομηχανικές διαδικασίες ή από άλλες πηγές. Περίπου το κόστος της πράσινης μεθανόλης στην εποχή μας κυμαίνεται από 800-1600 δολάρια ο τόνος και αυτή η μεγάλη διασπορά της τιμής έγκειται στο τρόπο δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα και την επεξεργασία αυτού.

Η πράσινη ηλεκτρομεθανόλη προέρχεται από τη χρήση CO₂ που αιχμαλωτίζεται από ανανεώσιμες πηγές (βιοενέργεια με αιχμαλώτιση και αποθήκευση άνθρακα και άμεση αιχμαλώτιση αέρα) και πράσινου υδρογόνου, δηλαδή υδρογόνο που παράγεται με ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Είναι γεγονός ότι λιγότερο από 0,2 εκατομμύρια τόνοι ανανεώσιμης μεθανόλης παράγονται ετησίως και μάλιστα είναι κυρίως βιομεθανόλη και όχι μεθανόλη παραγόμενη από τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεθανόλη που παράγεται με οποιονδήποτε τρόπο είναι χημικά πανομοιότυπη με τη μεθανόλη που παράγεται από ορυκτές πηγές καυσίμων. Το ενδιαφέρον για την ανανεώσιμη μεθανόλη οφείλεται στην ανάγκη μείωσης σημαντικά ή εξάλειψης των εκπομπών CO₂ για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, και ειδικότερα στην αυξανόμενη εστίαση στον περιορισμό της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας σε όχι περισσότερο από 1,5°C. Αυτό συνεπάγεται την επίτευξη καθαρών δεικτών εκπομπών άνθρακα σε όλους τους τομείς της οικονομίας έως τα μέσα του αιώνα (Dolan Dolf Gielen & Greg, 2021)

Επομένως, η **πράσινη μεθανόλη** είναι ένας τύπος μεθανόλης που παράγεται χρησιμοποιώντας βιώσιμους πόρους, με στόχο τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και τη συμβολή σε μια κυκλική οικονομία. Έτσι από τη μία πλευρά έχουμε την διαδρομή ηλεκτροκαυσίμων, όπου η ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την εξαγωγή υδρογόνου από το νερό μέσω ηλεκτρόλυσης, στη συνέχεια το υδρογόνο αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα που έχει δεσμευτεί από σημειακές πηγές (π.χ. βιομηχανικές ροές εκπομπής) ή από την ατμόσφαιρα και παράγεται η e-μεθανόλη. Από την άλλη πλευρά ωστόσο έχουμε την διαδρομή βιομάζας, όπου η οργανική ύλη υφίσταται ζύμωση ή αεριοποίηση (υποβάλλοντας την βιομάζα σε υψηλή θερμοκρασία απουσία αέρα) για να παραχθεί συνθετικό αέριο (syngas) το οποίο επεξεργάζεται σε αντιδραστήρα και μετατρέπεται σε βιο-μεθανόλη. Τέλος υπάρχει και η υβριδική βιο-

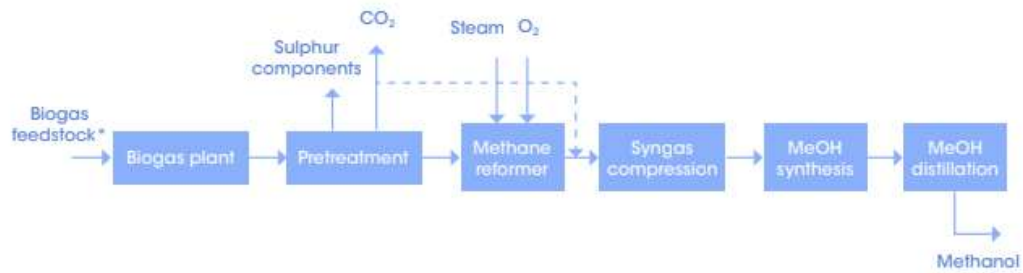
μεθανόλη που χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό των δύο μεθόδων, συνδυάζοντας βιογενές συνθετικό αέριο με υδρογόνο από την ηλεκτρόλυση.

Με βάση αυτό, παράγεται από βιομάζα, βιομηχανικά απόβλητα, αστικά απόβλητα και διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιώντας όμως ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Κάθε ένας από τους τρόπους για την παραγωγή της πράσινης μεθανόλης μπορεί να οδηγήσει τόσο σε οφέλη όσο και μη. Για την παραγωγή πιο πράσινης μεθανόλης, η πηγή του υδρογόνου όμως είναι σημαντική. Παρόλο που η υδρογόνωση του CO₂ είναι μια διαδικασία συλλογής και αξιοποίησης του CO₂, μπορεί να προκύψουν εκπομπές κατά την παροχή του υδρογόνου ως πρώτη ύλη. Επομένως, ένας αριθμός μελετών επικεντρώνεται στη διαδικασία παραγωγής υδρογόνου. Επιπλέον, για να επιτευχθεί ακόμα περισσότερη απανθρακοποίηση, ένας σημαντικός αριθμός ερευνών υποθέτει ότι το υδρογόνο για την υδρογόνωση του CO₂ παράγεται από ανανεώσιμη ενέργεια μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην **παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα** και από απόβλητα αστικών στερεών είναι σχετικά γνωστές επειδή είναι παρόμοιες ή ίδιες με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην εμπορική βιομηχανία βασισμένη σε αεριοποίηση, όπου οι πρώτες ύλες είναι συνήθως άνθρακας, βαριά απομεινάρια πετρελαίου και φυσικό αέριο. Ωστόσο, η αεριοποίηση διαφέρει στην προετοιμασία των πρώτων υλών. Οι κύριες διαδικασίες σε μια συμβατική μονάδα μεθανόλης είναι: προεπεξεργασία των πρώτων υλών, αεριοποίηση, αντίδραση μετατροπής του αερίου νερού σε αέριο ανύδρου (χωρίς νερό), καθαρισμός του αερίου, σύνθεση μεθανόλης και ξανά καθαρισμός.

Το βιοαέριο πρέπει να υποστεί προεπεξεργασία για να επιτύχει την ίδια ποιότητα με το ορυκτό φυσικό αέριο πριν τροφοδοτηθεί στον αναμορφωτή μεθανίου. Το CO₂ από αυτή την προεπεξεργασία μπορεί να επιστραφεί στο syngas που παράγεται ανάλογα με τον τύπο του αναμορφωτή μεθανίου που χρησιμοποιείται. Εναλλακτικά, το μεθάνιο μπορεί να αναμορφωθεί μαζί με μέρος του CO₂. Το παρακάτω σχήμα αποτυπώνει την παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα (βιοαέριο).

Διάγραμμα 12: Παραγωγή bio-methanol - Πηγή: (Dolan Dolf Gielen & Greg, 2021)

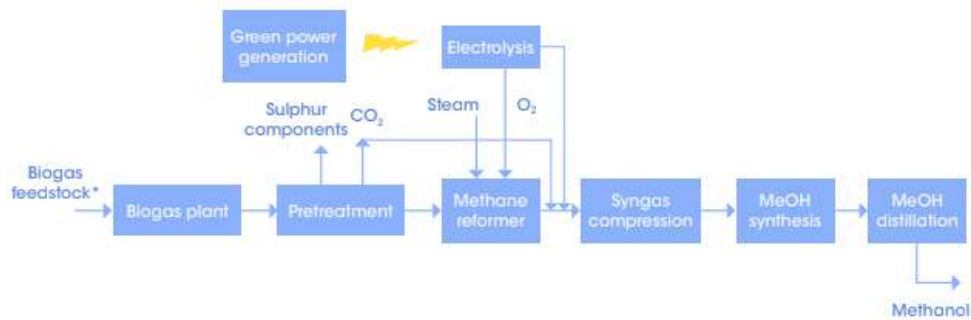


Το κλειδί για την επιτυχία της τεχνολογίας αεριοποίησης θα είναι η απόδοση της μονάδας αεριοποίησης. Για την παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas) κατάλληλου για μετατροπή σε μεθανόλη, απαιτείται γενικά αεριοποίηση σε υψηλότερη θερμοκρασία, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο σχηματισμός μεθανίου στον αεριοποιητή.

Αναλύοντας λίγο πιο πολύ την παραγωγή της βιο-μεθανόλης παρατηρούμε ότι για τη σύνθεση της, ο βέλτιστος λόγος H_2/CO είναι κοντά στο 2. Για να προσαρμόσουμε αυτόν τον λόγο, μέρος του CO_2 στο syngas μετατρέπεται με νερό σε H_2 μέσω της αντίδρασης. Αυτό δημιουργεί επίσης περισσεύον CO_2 , το οποίο διαχωρίζεται και εκπέμπεται απλώς στην ατμόσφαιρα. Επειδή η παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα παράγει πολλαπλάσιο CO_2 , το φαινομενικό ποσοστό μετατροπής της βιομάζας σε μεθανόλη μειώνεται. Η συνολική αποδοτικότητα άνθρακα σε αυτού του τύπου το σχήμα είναι περίπου 50%, που σημαίνει ότι μόνο περίπου το 50% του άνθρακα στην αρχική ύλη καταλήγει στη μεθανόλη.

Ένας τρόπος για να λυθεί το παραπάνω πρόβλημα και να οδηγηθούμε σε αύξηση του ποσοστού χρήσης άνθρακα (ώστε να έχουμε λιγότερες ακόμα εκπομπές) είναι η αντίδραση του εκπεμπόμενου CO_2 με υδρογόνο από κάποια άλλη πηγή για την παραγωγή περισσότερης μεθανόλης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί συνδυάζοντας το σχήμα παραγωγής της βιομεθανόλης με ένα μέρος του σχήματος παραγωγής της πράσινης μεθανόλης, δημιουργώντας μια υβριδική διαδικασία όπου σχεδόν το 100% του άνθρακα που εισέρχεται στη βιομάζα καταλήγει στο προϊόν μεθανόλης. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την παραγωγή της μεθανόλης μέσω αυτού του συνδυασμού (Dolan Dolf Gielen & Greg, 2021)

Διάγραμμα 13: Παραγωγή μεθανόλης από συνδυασμό βιομάζας και ηλεκτρόλυση



Πηγή: (Dolan Dolf Gielen & Greg, 2021)

Το παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνει μια σύνθετη λύση που εμπεριέχει τόσο τη χρήση βιομάζας αλλά και ηλεκτρόλυσης. Η e-methanol που είναι η καθαρά πράσινη μεθανόλη είναι ένα υγρό προϊόν που είναι εύκολο να αποκτηθεί από CO₂ και πράσινο υδρογόνο μέσω μιας καταλυτικής διαδικασίας. Το πρόβλημα είναι ότι μόνο περίπου το 4% του υδρογόνου αποκτάται μέσω ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιώντας είτε ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο είτε μια ανανεώσιμη πηγή (πράσινο υδρογόνο).

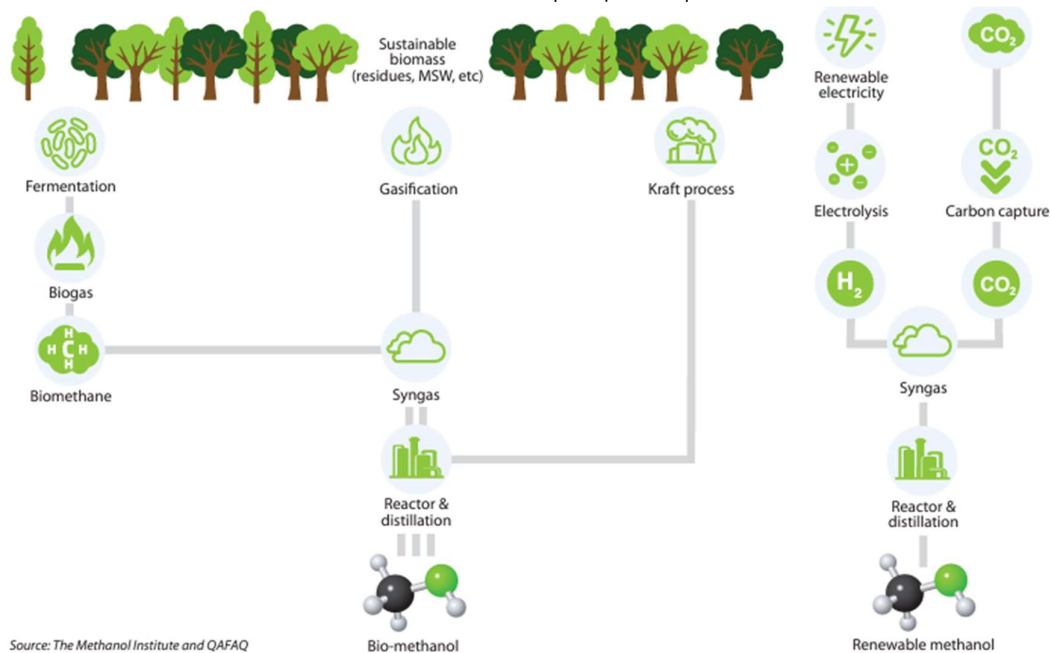
Στην προσπάθεια μείωσης της παγκόσμιας εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και τις συναφείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), η παραγωγή μεθανόλης χρησιμοποιώντας ηλεκτροχημεία έχει βεβαίως προκαλέσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια και αποτελεί ήδη αποδεδειγμένη έννοια. Αποτελώντας μέρος μιας προτεινόμενης μελλοντικής «οικονομίας μεθανόλης», αυτή η ιδέα θα αξιοποιήσει τόσο την ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια όσο και τα απόβλητα CO₂ που θα εκπέμπονταν στην ατμόσφαιρα ή θα αιχμαλωτιζόνταν για αποθήκευση.

Παράλληλα μελέτες έχουν δείξει ότι η παραγωγή μεθανόλη με τη χρήση αιολικής, ηλιακής φωτοβολταϊκής, υδροηλεκτρικής ή γεωθερμικής ενέργειας μπορεί επίσης να συμβάλει στην αντιμετώπιση του προβλήματος αποθήκευσης αυτής της συχνά μεταβλητής ενέργειας, ενώ ισορροπεί το δίκτυο και αξιοποιεί τη φθηνή ηλεκτρική ενέργεια όταν η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση (Fenwick Andrew, 2021)

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι ηλεκτρολυτών, όλοι οι οποίοι μπορούν να παίξουν ρόλο στη σύνθεση της ανανεώσιμης μεθανόλης. Ο πρώτος από αυτούς είναι οι *αλκαλικοί ηλεκτρολύτες*, που είναι εμπορικά διαθέσιμοι εδώ και αρκετά χρόνια. Αυτοί χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια νικελίου σε θερμοκρασίες κάτω των 100°C για να

διαχωρίσουν το νερό από έναν ισχυρά αλκαλικό ηλεκτρολύτη, συνήθως με πάνω από 20% υδροξείδιο του καλίου, με έναν πορώδη διαχωριστή ανάμεσα στα ηλεκτρόδια για να αποτρέψει τη βραχυκύκλωση. Στη συνέχεια υπάρχουν οι ηλεκτρολύτες PEM (*Proton Exchange or Polymer Electrolyte Membranes*) που λειτουργούν σε παρόμοιο εύρος θερμοκρασιών με τα αλκαλικά συστήματα. Ωστόσο μια βασική διαφορά του συστήματος αυτού είναι ότι χρησιμοποιεί συνήθως καταλύτες με βάση την πλατίνα για τη μείωση των πρωτονίων σε υδρογόνο στην κάθοδο και υλικά με βάση το οξείδιο του ιριδίου για την οξείδωση του νερού στην άνοδο. Επιπλέον το κύριο πλεονέκτημα των ηλεκτρολυτών αυτών σε σχέση με τους αλκαλικούς είναι ότι μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος (ρυθμός αντίδρασης) και έτσι μπορούν να παράγουν περισσότερο υδρογόνο ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας. Τέλος, η τελική κατηγορία ηλεκτρολυτών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σύνθεση ανανεώσιμης μεθανόλης είναι οι ηλεκτρολύτες στερεού οξειδίου. Αυτοί έχουν καλή αγωγιμότητα για ιόντα οξυγόνου σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως 800°C. Οι καταλύτες τείνουν να περιέχουν βασικά μέταλλα όπως το νικέλιο. Ένα βασικό πλεονέκτημα του συστήματος στερεού οξειδίου είναι ότι μπορεί να είναι πολύ ενεργειακά αποδοτικό αν η ενσωμάτωση της θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλεονεκτικά σε άλλα μέρη του συστήματος. Ωστόσο αξίζει να αναφερθεί ότι σαν μέθοδος δεν είναι τόσο ανεπτυγμένη σε σχέση με τις δύο προηγούμενες. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την παραγωγή της βιο-μεθανόλης και της e-μεθανόλης αντίστοιχα.

Εικόνα 8: Βιο-Μεθανόλη & e-μεθανόλη

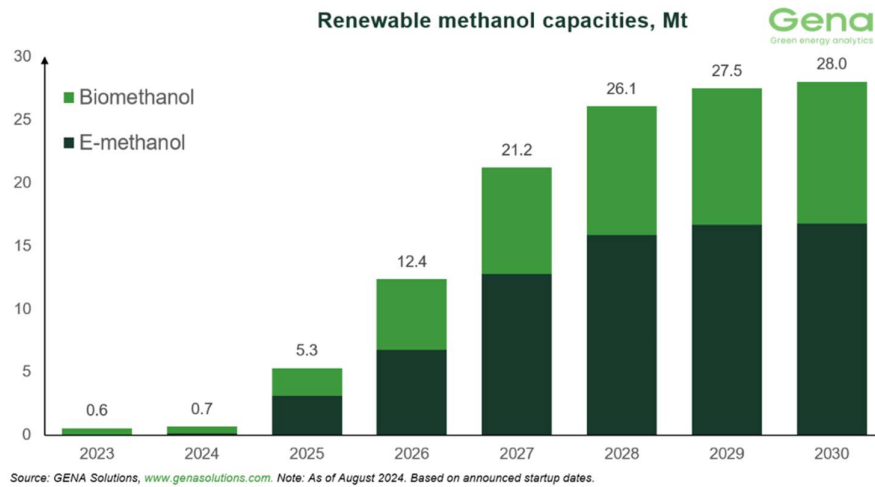


Γενικά, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, η ανανεώσιμη μεθανόλη ως «ηλεκτροκαύσιμο» μειώνει τις εκπομπές άνθρακα κατά 65 έως 95% ανάλογα με την πρώτη ύλη και τη διαδικασία παραγωγής. Αυτή είναι μια από τις υψηλότερες πιθανές μειώσεις οποιουδήποτε καυσίμου που αναπτύσσεται επί του παρόντος για να αντικαταστήσει τη βενζίνη, το ντίζελ, τον άνθρακα και το μεθάνιο. Μάλιστα μελέτες έχουν δείξει ότι η ανανεώσιμη μεθανόλη μπορεί να παραχθεί από πολλές άφθονες πηγές που είναι διαθέσιμες σε όλο τον κόσμο.

Παράλληλα, αξίζει να αναφερθεί ότι η μεθανόλη καίγεται καθαρότερα από τη συμβατική βενζίνη, μειώνοντας τις εκπομπές άλλων ρύπων (PM, NOx, SOx). Μάλιστα, όταν χρησιμοποιείται ως θαλάσσιο καύσιμο, οι εκπομπές SOx, PM και NOx μειώνονται κατά περισσότερο από 99%, 95% και 80% αντίστοιχα, σε σύγκριση με το αργό πετρέλαιο. Με την σύγκριση διαφόρων πηγών βιομάζας για την παραγωγή μεθανόλης, διαπιστώθηκε από το Methanol Institute ότι οι εκπομπές CO₂eq σε επίπεδο WtW από τα απορρίμματα ξύλου ήταν 5.3-22.6 g CO₂-eq/MJ, από το καλλιεργούμενο ξύλο (ξύλο που αποκτάται από φυτείες δέντρων) ήταν 4.6-16.5 g CO₂-eq/MJ, από γλυκερίνη και βιοαέριο παρουσίασε ελαφρώς υψηλότερες εκπομπές, με 30.6 gCO₂-eq/MJ και 30-34.4 gCO₂-eq/MJ, αντίστοιχα. Οι εκπομπές CO₂ WtW από τη μεθανόλη που προέρχεται από ανακύκλωση CO₂ και H₂ από ανανεώσιμες πηγές εκτιμήθηκαν σε 1.74-33.1 g CO₂-eq/MJ, ανάλογα με διάφορες υποθέσεις (IRENA, 2021).

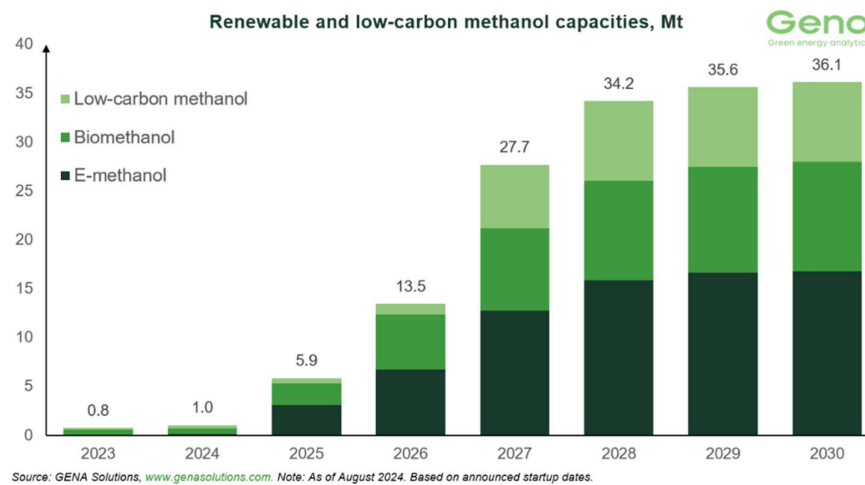
Επιπλέον, με βάση την παραπάνω ανάλυση, τα παρακάτω διαγράμματα αποτυπώνουν την διαθέσιμη ποσότητα ανανεώσιμης μεθανόλης (βιομεθανόλης και e-μεθανόλης) σήμερα, αλλά και την πρόβλεψη για ποσότητες αντίστοιχης μεθανόλης μέχρι το 2030. Αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε είναι ότι όλο και μεγαλύτερες ποσότητες πρόκειται να είναι διαθέσιμες γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα χρήσης της και καθιέρωσής της ως μελλοντικό καύσιμο.

Διάγραμμα 14: Παραγωγή Πράσινης μεθανόλης μέχρι το 2023 (α)



Διάγραμμα 15: Παραγωγή Πράσινης Μεθανόλης μέχρι το 2023 (β)

Το παρακάτω διάγραμμα (15β) εμπεριέχει μέσα και την μεθανόλη παραγόμενη από LNG (συμβατική μεθανόλη).



2.4 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ

Οι κύκλοι ζωής των καυσίμων κατηγοριοποιούνται στις παρακάτω φάσεις:

1. Well-to-Tank: όλα τα στάδια από την παραγωγή του καυσίμου μέχρι και την μεταφορά στην δεξαμενή του πλοίου.
2. Tank-to-Wake: το στάδιο από την μεταφορά του καυσίμου στη δεξαμενή του πλοίου μέχρι και την κατανάλωσή του για την λειτουργία του πλοίου.

3. Well-to-Wake: όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, δηλαδή από την παραγωγή του καυσίμου μέχρι και την καύση του.

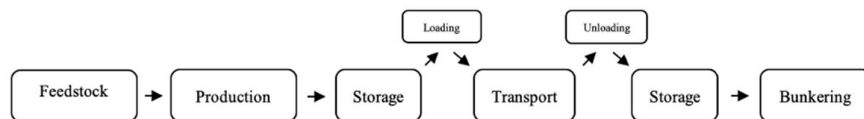
(ΕΥΘΥΜΙΑΔΟΥ ΕΛΙΣΑΒΕΤ, 2023)

Μια απλοποιημένη εφοδιαστική αλυσίδα για την μεθανόλη και πιο συγκεκριμένα για την πράσινη μεθανόλη θα περιλάμβανε τα βασικά στάδια εντοπισμού της πρώτης ύλης, της παραγωγής, της υγροποίησης, της μεταφοράς, της αποθήκευσης και του ανεφοδιασμού, καθώς και της φόρτωσης και εκφόρτωσης πριν και μετά τη μεταφορά.

Το σημείο εκκίνησης είναι ο πρωταρχικός ενεργειακός πόρος, με το τελευταίο σημείο να είναι ο ανεφοδιασμός. Το επόμενο βήμα από το αρχικό που είναι η πρώτη ύλη, είναι η παραγωγή. Μετά την παραγωγή, η μεθανόλη αποθηκεύεται πριν μεταφερθεί σε λιμάνι ή τερματικό σταθμό. Κατά την άφιξη στο λιμάνι ή τον τερματικό σταθμό, η μεθανόλη αποθηκεύεται ξανά, πριν γίνει ανεφοδιασμός στα πλοία.

Αυτή η απλοποιημένη έκδοση μιας πιθανής εφοδιαστικής αλυσίδας μεθανόλης αντλεί έμπνευση από το άρθρο των Al-Breiki και Bicer (2020) όπου παρουσιάζεται μια απεικόνιση της εφοδιαστικής αλυσίδας της μεθανόλης. (Olufsen, 2023). Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει αυτή την αλυσίδα παραγωγής.

Διάγραμμα 16: Αλυσίδα παραγωγής της μεθανόλης



Τα πρώτα στάδια του κύκλου ζωής είναι η εξόρυξη, παραγωγή και μεταφορά του φυσικού αερίου και έπειτα ακολουθεί το στάδιο της υγροποίησης, απαραίτητο για τη μεταφορά. Για το στάδιο της αναμόρφωσης, χρησιμοποιούνται περίπου 0.820 m³ φυσικού αερίου για την παραγωγή 1 kg μεθανόλης και οι κύριες εκπομπές είναι οι εκπομπές από την χρήση φυσικού αερίου. Η διαδικασία παραγωγής μεθανόλης είναι ιδιαίτερα εξώθερμη και η περίσσεια θερμότητας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην εγκατάσταση. Μπορεί επομένως να θεωρηθεί πως δεν υπάρχουν επιπλέον εισροές ενέργειας κατά τη διαδικασία παραγωγής (IMO, 2016). Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι για την παραγωγή 1 kg μεθανόλης παράγονται από τη συνολική διαδικασία αναμόρφωσης 240 g CO₂. Οι συνολικές εκπομπές κατά το στάδιο WtT συνοψίζονται παρακάτω:

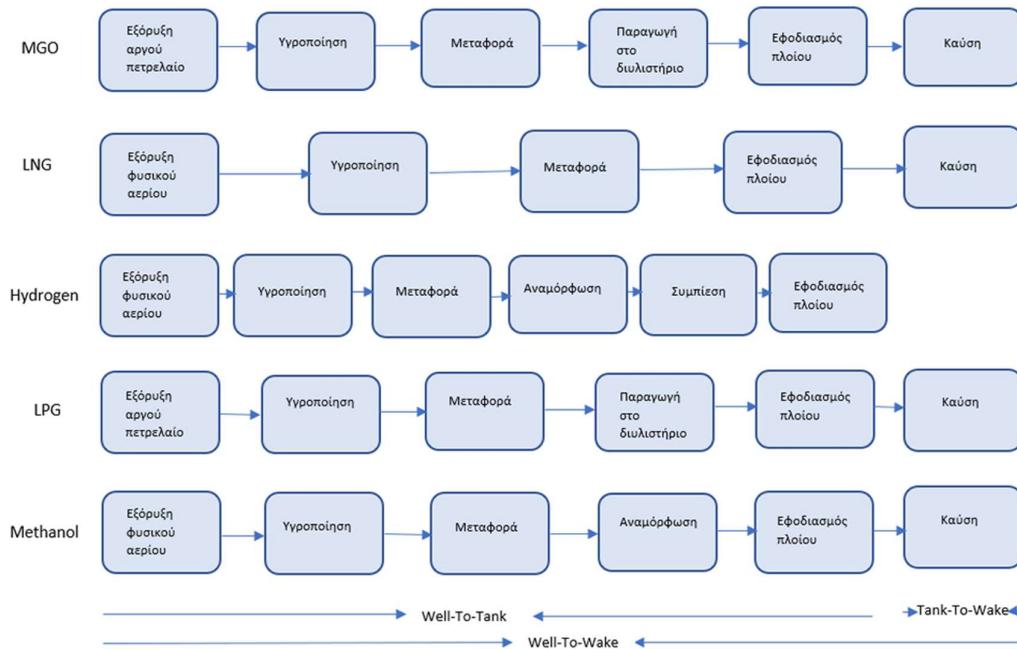
Πίνακας 2: Ρύποι Μεθανόλης σε επίπεδο WiT

| Ρύποι | Ποσότητα σε gr |
|-----------------------|-----------------------|
| CO₂ | 624,11 |
| CO | 15,45 |
| NO_x | 0,99 |
| SO_x | 0,08 |
| NMVOC | 0,18 |
| PM | 0,03 |

Από την άλλη πλευρά, ο κύκλος ζωής της πράσινης μεθανόλης και συγκεκριμένα της μεθανόλης με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει πέντε κύρια τμήματα διεργασιών όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα που ακολουθεί. Τα στάδια αυτά περιλαμβάνουν αρχικά την παραγωγή του πράσινου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης τροφοδοτούμενης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ακολουθεί στη συνέχεια η συμπίεση τόσο του παραγόμενου υδρογόνου όσο και του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα, η αποθήκευση και η διανομή. Τέλος, το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα τροφοδοτούνται σε έναν αντιδραστήρα που θα παράγει την πράσινη μεθανόλη. Αυτή στο τέλος παρέχεται ή μάλλον ενδέχεται να δίνεται τόσο σε ιατρικές και μεταλλουργικές εργασίες όσο και βιομηχανίες και ως καύσιμο στις μεταφορές. Το αποτύπωμα άνθρακα σε αυτή την περίπτωση είναι μηδενικό.

Το πρώτο από τα δύο διαγράμματα που ακολουθούν είναι ο Κύκλος Ζωής της συμβατικής μεθανόλης καθώς και άλλων Εναλλακτικών Καυσίμων (Διάγραμμα 18), ενώ το δεύτερο (Διάγραμμα 19) εστιάζει στην παραγωγή της πράσινης Μεθανόλης.

Διάγραμμα 17: Κύκλος Ζωής Διαφόρων Καυσίμων

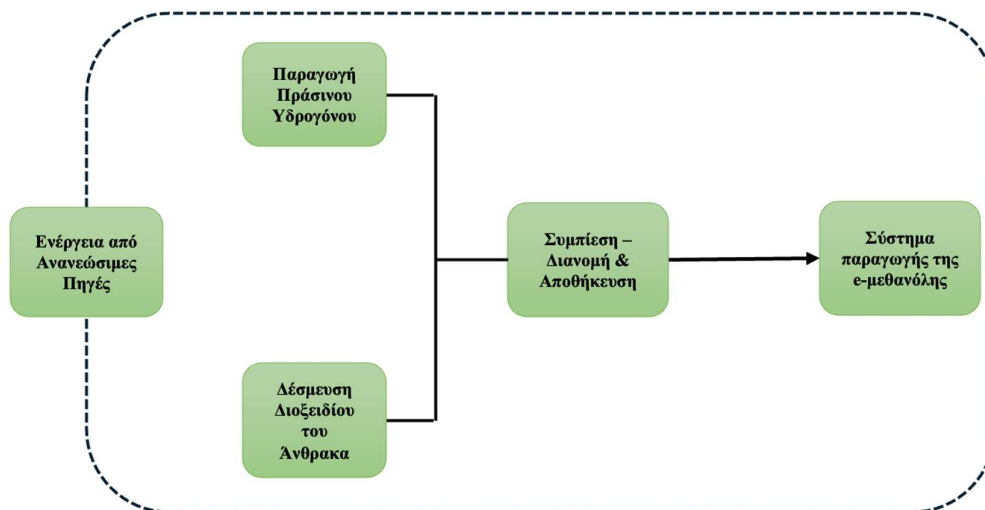


Πηγή: (ΕΥΘΥΜΙΑΔΟΥ ΕΛΙΣΑΒΕΤ, 2023)

Συγκριτικά με το παραπάνω διάγραμμα, εστιάζοντας στο κομμάτι της παραγωγής υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις αναφορικά με την Πράσινη μεθανόλη μιας και τόσο η πρώτη ύλη όσο και κάποια ενδιάμεσα στάδια μέχρι την τροφοδοσία και καύση είναι διαφορετικά.

Άρα το WtT διαφοροποιείται λίγο ενώ το TtW παραμένει το ίδιο. Διαγραμματικά θα μπορούσε να αποτυπωθεί το WtT όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

Διάγραμμα 18: Κύκλος ζωής της Πράσινης Μεθανόλης



Το μεγαλύτερο εμπορικό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρομεθανόλης στο κόσμο ξεκίνησε την παραγωγή το 2022 στην πόλη Anyang στην Κίνα. Πρόκειται για ένα σταθμό που μπορεί να παράγει 110.000 τόνους μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο και δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα το χρόνο, ενώ ένα δεύτερο εργοστάσιο ξεκίνησε το 2023 να φτιάχνεται στο νότιο τμήμα της Δανίας με σκοπό να ολοκληρωθεί το 2030 και με παραγωγή πράσινης μεθανόλης 300.000 τόνων ετησίως. Μεγάλο μέρος του συγκεκριμένου εργοστασίου με ποσοστά κατέχει η Maersk με σκοπό να μπορεί να προμηθεύσει άμεσα τα πλοία της με πράσινη μεθανόλη. Η εταιρία που βρίσκεται από πίσω από την παραγωγή του συγκεκριμένου εργοστασίου είναι η C2X που θα παρέχει την παραγόμενη πράσινη μεθανόλη τόσο σε εταιρίες χημικών όσο και στη Ναυτιλία. Παράλληλα, επισκευή εργοστασίου παραγωγής πράσινης μεθανόλης στην Ευρώπη πραγματοποιεί και ένας Ισπανο-Γερμανός κατασκευαστής ηλιακών και ανανεώσιμων πηγών υδρογόνου στην νότια Ισπανία η οποία θα παράγει μέχρι και 1.000.000 τόνους πράσινης μεθανόλης ετησίως από το 2029 και μετά, γεγονός που θα το κατατάσσει στο μεγαλύτερο εργοστάσιο στην Ευρώπη.

Τα παραπάνω αποδεικνύουν το μεγάλο ενδιαφέρον που υπάρχει σε παγκόσμιο επίπεδο αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρομεθανόλης, καθώς και την αναγκαία μετάβαση από τα παράγωγα ορυκτών καυσίμων σε ανανεώσιμες πηγές. Η συνολική ετήσια συνεισφορά της μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο είναι προς το παρόν αμελητέα σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες. Λιγότερο από 0.2 εκατομμύρια τόνοι πράσινης μεθανόλης παράγονται ετησίως. Η παρακάτω εικόνα που προέρχεται από το Ινστιτούτο Μεθανόλης αναδεικνύει την όλο και αυξανόμενη τάση για παραγωγή πράσινης μεθανόλης από πολλές χώρες της Ευρώπης και όχι μόνο. Το Ινστιτούτο Μεθανόλης παρακολουθεί 90 έργα που προβλέπεται να παράγουν σχεδόν 9 εκατομμύρια τόνους μεθανόλης ετησίως όταν τεθούν σε λειτουργία (έως το 2027). Αυτή η παραγωγή δεν θα προορίζεται αποκλειστικά για ναυτιλιακή χρήση, αλλά μερικά έργα θα είναι.

Εικόνα 9: Έργα πράσινης Μεθανόλης μέχρι το 2027



Projects are in various stages of operation
Source: The Methanol Institute

Πηγή: (LlyodsRegister, 2023)

ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 3^ο: ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΕΝΑ ΠΛΟΙΟ

3.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ/ΟΔΗΓΙΕΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΑΝΟΛΗ ΩΣ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΚΑΥΣΙΜΟ

Η μεθανόλη έχει ενδιαφέρον ως εναλλακτικό καύσιμο χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, επειδή είναι δυνατό να παραχθεί με ανανεώσιμες πρώτες ύλες όπως αστικά απόβλητα, βιομηχανικά απόβλητα, βιομάζα και διοξείδιο του άνθρακα

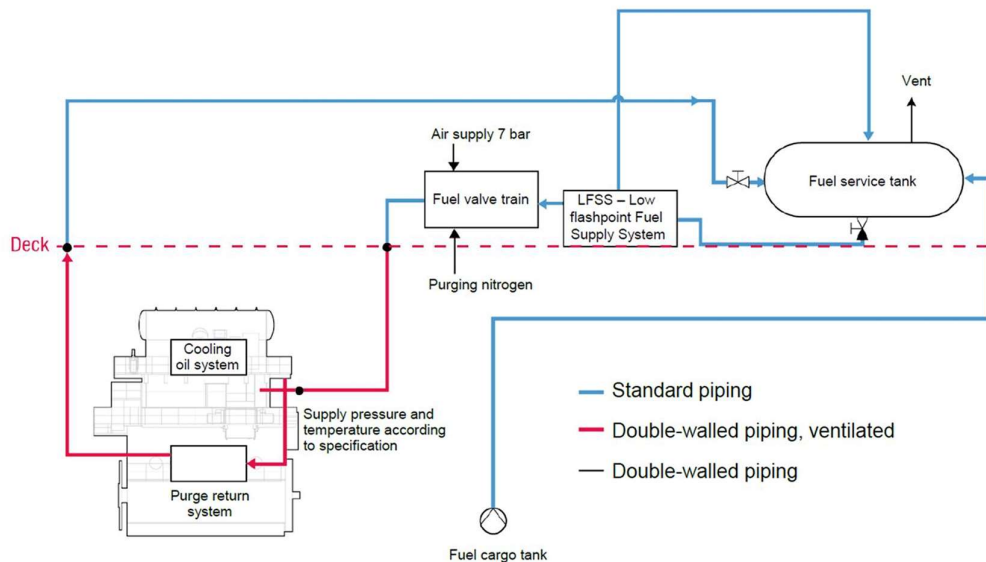
Η μεθανόλη αποτελεί ένα από τα πιο οικονομικά και παγκοσμίως διαθέσιμα καύσιμα. Η αυξανόμενη ζήτηση για τέτοιου είδους εναλλακτικά καύσιμα τα οποία θα πρέπει να ανταποκρίνονται στους όλο και απαιτητικότερους περιορισμούς της Ε.Ε και του IMO καθιστά την μεθανόλη ως ένα πολύ ισχυρό παίκτη στον αγώνα για το κυρίαρχο «πράσινο» καύσιμο το οποίο θα κατακτήσει την αγορά. Η μεθανόλη μειώνει σημαντικά τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x), οξειδίων του αζώτου (NO_x) και μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέροντας τους μια θέση στην αγορά της ναυτιλίας χωρίς περαιτέρω ή τουλάχιστον μεγάλου βαθμού επενδύσεις από τους πλοιοκτήτες αφού το κόστος μετατροπής ή η εγκατάσταση νέων μηχανών για την υποστήριξη του καυσίμου αυτού είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με άλλες εναλλακτικές. (Περιβόλας, 2021)

Η πρώτη πολιτική για τα βιοκαύσιμα στην Ευρώπη εισήχθη το 2003, θέτοντας στόχους ανάμειξης για το 2010. Αυτή η πολιτική ενσωματώθηκε στην RED το 2009, που έθεσε υποχρέωση 10% ανανεώσιμης ενέργειας στις μεταφορές για το 2020. Το 2018, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο και η Επιτροπή συμφώνησαν να αναθεωρήσουν την RED, απαιτώντας 14% ανανεώσιμης ενέργειας στις μεταφορές μέχρι το 2030. Η RED II έχει δημιουργήσει νέες αγορές για συμβατικά βιοκαύσιμα όπως η αιθανόλη και το βιοντίζελ και για εναλλακτικά βιοκαύσιμα όπως η ανανεώσιμη μεθανόλη, ειδικά όταν παράγεται από απόβλητα, υπολείμματα ή ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Άλλες πολιτικές της ΕΕ που επηρεάζουν την πιθανή υιοθέτηση της ανανεώσιμης μεθανόλης είναι η Οδηγία για την Ποιότητα των Καυσίμων, η Οδηγία για τις Υποδομές Εναλλακτικών Καυσίμων και η Οδηγία για την Ποιότητα του Αέρα, μεταξύ άλλων (Klein, February 2020)

3.2 ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

Το σχεδιάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνει το σύστημα τροφοδοσίας του πλοίου με μεθανόλη από το σημείο της δεξαμενής καυσίμου μέχρι και την εισαγωγή του στη μηχανή.

Διάγραμμα 19: Διάγραμμα Τροφοδοσίας πλοίου με μεθανόλη



Πηγή: (Hughes, 2016)

Το σύστημα τροφοδοσίας όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα περιλαμβάνει δεξαμενές αποθήκευσης μεθανόλης, σωληνώσεις, αντλίες και βαλβίδες, με τις δεξαμενές να πρέπει να είναι κατασκευασμένες από υλικά ανθεκτικά στη μεθανόλη για αποφυγή διαρροών.

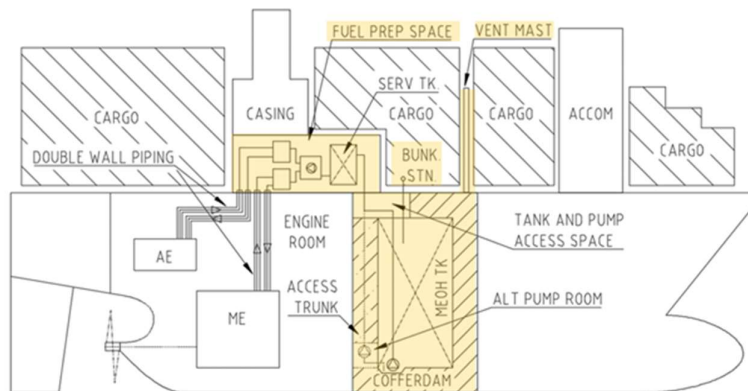
Όταν απαιτείται η τροφοδοσία μεθανόλης, οι αντλίες ενεργοποιούνται για να αντλήσουν το καύσιμο από τις δεξαμενές. Παράλληλα είναι αυτές που ελέγχουν την πίεση και τη ροή της μεθανόλης, διασφαλίζοντας ότι οι απαιτούμενες ποσότητες φτάνουν στη μηχανή. Πέρα από τις αντλίες τροφοδοσίας (transfer pumps) υπάρχουν και οι αντλίες ενίσχυσης (booster pumps) που φτάνουν και μέχρι 4000 bar πίεσης. Στη συνέχεια η μεθανόλη μεταφέρεται μέσω διπλών σωληνώσεων, οι οποίες είναι ειδικά σχεδιασμένες για να αντέχουν στις χημικές ιδιότητες της μεθανόλης. Παράλληλα θα πρέπει να είναι και κατάλληλα μονωμένες για να αποφεύγεται η διαρροή και η εξάτμιση. Καθώς η μεθανόλη κατευθύνεται προς τη μηχανή, περνάει από φίλτρα και

διαχωριστές, οι οποίοι απομακρύνουν τυχόν ακαθαρσίες ή υγρασία που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση της μηχανής.

Στη συνέχεια, η καθαρή μεθανόλη εισάγεται στη μηχανή, όπου αναμιγνύεται με τον αέρα για να σχηματίσει ένα κατάλληλο μίγμα καυσίμου. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ο ψεκασμός της μεθανόλης γίνεται μέσω ειδικών μπεκ, που εγγυώνται ότι το καύσιμο διαχέεται ομοιόμορφα και καίγεται αποτελεσματικά.

Πρόσφατα, το 2023 και το 2024, η Maersk ναυπήγησε δυο πλοία με μηχανές που καίνε μεθανόλη, ένα feeder Vessel 1900 TEU & ένα Large Vessel 14000 TEU, με το πρώτο να έχει ως μηχανή την MAN G50 Engine 1500 m³ Methanol και το δεύτερο να έχει MAN G95 Engine 16000 m³ Methanol. Το παρακάτω σχέδιο αποτυπώνει με σύντομο τρόπο τη χωροθέτηση και αρχιτεκτονική του συστήματος επί των πλοίων μέρος του οποίου βρίσκεται στο κατάστρωμα και μέρος αυτού στο μηχανοστάσιο. (MAERSK, 2023)

Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική συστήματος μεθανόλης σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων



Πηγή: (MAERSK, 2023)

3.3 ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ & ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΣ ΠΛΟΙΟΥ

Σε γενικές γραμμές, ως υγρό καύσιμο στην θερμοκρασία περιβάλλοντος και την πίεση, ο εφοδιασμό και ο ανεφοδιασμός με μεθανόλη είναι πολύ παρόμοιος με την περίπτωση του MGO ή HFO. Η ίδια υποδομή που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και τον εφοδιασμό των παραδοσιακών ναυτιλιακών καυσίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη μεθανόλη, μετά από μερικές, που συμπεριλαμβάνουν και κόστος, τροποποιήσεις. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για τον εφοδιασμό της μεθανόλης: με φορτηγό, με πλωτήρα και απ' ευθείας στο λιμάνι.

Αναλυτικότερα, σχετικά με τον ανεφοδιασμό πλοίων με μεθανόλη απαραίτητο είναι να υπάρχει ο σταθμός κατάλληλου ανεφοδιασμού και το σύστημα ανεφοδιασμού αυτού. Ο σταθμός ανεφοδιασμού πρέπει να βρίσκεται σε θέση όπου θα παρέχεται επαρκής φυσικός αερισμός, να είναι διαχωρισμένος από άλλες περιοχές του πλοίου με αεροστεγείς διαφράγματα, εκτός εάν βρίσκεται στην περιοχή φορτίου σε δεξαμενόπλοια, ενώ παράλληλα περιβλήματα πρέπει να τοποθετούνται κάτω από τις συνδέσεις ανεφοδιασμού.

Η διαμόρφωση του σταθμού ανεφοδιασμού και του συστήματος ανεφοδιασμού παρότι παρουσιάζει ομοιότητες με το αργό πετρέλαιο είναι πιο εκτεταμένη σε σύγκριση με αυτό, λόγω της φύσης της μεθανόλης ως καυσίμου και των χημικών και φυσικών της ιδιοτήτων. Η μεθανόλη για παράδειγμα όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα είναι τοξική και έχει χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης μόνο 12 °C. Η θερμοκρασία ανάφλεξης είναι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία ένα υγρό απελευθερώνει ατμούς σε επαρκή συγκέντρωση ώστε να σχηματίσει ένα αναφλέξιμο μίγμα με τον αέρα. Αυτή η ιδιότητα της μεθανόλης σε συνδυασμό με τη χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης που απαιτείται, οδηγεί σε πρόσθετα μέτρα ελέγχου. Συνεπώς, απαιτούνται επιπλέον συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου, όπως συναγερμοί υπερχειλίσης, αυτόματη διακοπή, παρακολούθηση εξαερισμού και ανίχνευση αερίων, τα οποία αναφέρονται στους κανόνες των νηογνομόνων αντίστοιχα. Αυτές οι προστατευτικές φράξεις έχουν επίσης σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την έκθεση του πληρώματος στη μεθανόλη, λόγω των τοξικών της ιδιοτήτων. Η μεθανόλη είναι τοξική εάν καταποθεί, έρθει σε επαφή με το δέρμα ή εάν εισπνευσθούν οι ατμοί της. Εάν η μεθανόλη καταναλωθεί σε σχετικά μεγάλες ποσότητες, μεταβολίζεται σε μυρμηκικό οξύ ή άλατα φορμικού οξέος, τα οποία είναι δηλητηριώδη για το κεντρικό νευρικό σύστημα και μπορεί να προκαλέσουν τύφλωση, κώμα και θάνατο (30 mL είναι δυνητικά θανατηφόρος δόση) (Hughes, 2016)

Αναφορικά με την αποθήκευση της μεθανόλης ως καύσιμο επί του πλοίου αυτό απαιτεί μεγάλο χώρο αποθήκευσης, επιπλέον της αποθήκευσης πετρελαίου καυσίμου που απαιτείται για την καύση της. Συγκεκριμένα απαιτεί μια δεξαμενή καυσίμου και μια δεξαμενή «υπηρεσίας» καυσίμου, τη λεγόμενη service tank, με τη δεύτερη να είναι τοποθετημένη στο κατάστρωμα. Οι δεξαμενές καυσίμου θα πρέπει να περιβάλλονται από cofferdams εκτός από το τμήμα κάτω από τη γραμμή του νερού (waterline level) προς το περίβλημα του πλοίου. Οι δεξαμενές πρέπει να είναι μεγάλες και σχεδόν κυκλικές για να βελτιστοποιηθεί η αναλογία καμπύλης προς δεξαμενή καυσίμου. Οι

δεξαμενές θα πρέπει να είναι επενδυμένες όπως αυτές των χημικών πλοίων και η επένδυση θα πρέπει να διαθέτει εγγύηση μόνο από τον κατασκευαστή για τις λείες επιφάνειες των δεξαμενών. Μάλιστα αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάγκη για δομική ενίσχυση του περιβλήματος τους καθιστά δύσκολη την τοποθέτηση των δεξαμενών κοντά στο περίβλημα του πλοίου (*εικόνα 10 παραπάνω*).

Παράλληλα, οι δεξαμενές που τοποθετούνται στο κατάστρωμα θα πρέπει να προστατεύονται τόσο από μηχανικές ζημιές αλλά και από την πιθανότητα πυρκαγιάς ενώ περιβάλλονται πάντα από κάποια προστασία επίσης. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η διαμόρφωση της δεξαμενής αποθήκευσης καυσίμου μεθανόλης είναι πιο περίπλοκη σε σύγκριση με το συμβατικό πετρέλαιο, λόγω της φύσης και των ιδιοτήτων της μεθανόλης ως καυσίμου. Απαιτούνται επιπλέον συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου, συστήματα ανίχνευσης αερίου, συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς σε χώρους δίπλα στις δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμου και συστήματα πυρόσβεσης. Ιδιαίτερα τα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς είναι σημαντικά, λόγω του ότι μια πυρκαγιά με βάση τη μεθανόλη είναι αόρατη, σε αντίθεση με τη βενζίνη για παράδειγμα ή το πετρέλαιο όπου υπάρχει ορατή φλόγα.

Επίσης, με βάση την ενεργειακή πυκνότητα, οι δεξαμενές πάνω σε ένα πλοίο θα είναι μεγαλύτερες για τη μεθανόλη από ό,τι οι δεξαμενές MGO, αλλά παρόμοιου μεγέθους με τις δεξαμενές υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Παράλληλα, οι δεξαμενές μεθανόλης μπορούν να εγκατασταθούν σε περιοχές του πλοίου όπου άλλες δεξαμενές καυσίμου, όπως η αμμωνία και το LNG, δεν θα μπορούσαν να εγκατασταθούν λόγω των πιο πολύπλοκων χαρακτηριστικών καυσίμου τους (όπως πίεση και τοξικότητα). Ως αποτέλεσμα, η συνολική κατανάλωση χώρου για τη μεθανόλη στο πλοίο είναι λίγο μικρότερη σε σύγκριση με το LNG και την αμμωνία. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές κινητήρων, οι δεξαμενές για τη μεθανόλη θα είναι μόνο 1,6 φορές μεγαλύτερες από αυτές για το MGO. Λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των δεξαμενών, μπορεί να υπάρχει μια αντιστάθμιση μεταξύ της χωρητικότητας μεταφοράς φορτίου και του προτύπου ανεφοδιασμού όταν χρησιμοποιείται η μεθανόλη ως ναυτιλιακό καύσιμο (Nora Wissner, 2023)

Αναφορικά με την αποθήκευση της μεθανόλης στους λιμένες για χρήση ως θαλάσσιο καύσιμο ήδη πραγματοποιείται, αν και σε χαμηλές ποσότητες, προκειμένου να καλύψει τη σημερινή παγκόσμια ζήτηση, κυρίως από αρχικά πιλοτικά έργα. Ωστόσο, η δυνατότητα αποθήκευσης έχει ήδη ποσοτικοποιηθεί παγκοσμίως σε περίπου 25 Mt, με

περαιτέρω σημαντική δυνατότητα κλιμάκωσης αυτής της ικανότητας μέσω της μετατροπής της υφιστάμενης υποδομής αποθήκευσης προϊόντων πετρελαίου, εφόσον υπάρχει επαρκής ζήτηση. Οι προβλέψεις για τη ζήτηση θα μπορούσαν να ξεπεράσουν τα 200 Mt ετησίως, βασισμένες σε φιλόδοξες στρατηγικές για την αποανθρακοποίηση της ναυτιλίας μέχρι το 2050. Αυτό θα απαιτούσε επιπλέον επενδύσεις σε νέα αποθηκευτική ικανότητα για τη μεθανόλη, εάν πραγματοποιηθεί τέτοια ζήτηση από τον ναυτιλιακό τομέα όπως προβλέπεται από τις φιλόδοξες στρατηγικές αποανθρακοποίησης.

3.4 ΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ - ΧΡΗΣΗ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ, Η ΚΑΥΣΗ

Η μεθανόλη είναι ένα ευέλικτο καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, και σε υβριδικά και οχήματα ή πλοία με κυψέλες καυσίμου. Είναι υγρό σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, και έτσι είναι εύκολο να αποθηκευτεί, να μεταφερθεί και να διανεμηθεί. Είναι συμβατό με την υπάρχουσα υποδομή διανομής και μπορεί να αναμειχθεί με συμβατικά καύσιμα.

Σήμερα υπάρχουν αρκετές εταιρείες έχουν αναπτύξει κινητήρες ναυτιλίας έτοιμους για μεθανόλη (methanol-ready) και αντίστοιχα συστήματα εφοδιασμού αυτής. Οι εσωτερικής καύσης κινητήρες που λειτουργούν με μεθανόλη έχουν υψηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας και είναι διαθέσιμοι εμπορικά. Κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με μεθανόλη σε ναυτιλιακό περιβάλλον βρίσκονται αυτή τη στιγμή υπό ανάπτυξη με επιδείξεις πιλοτικών εφαρμογών να λαμβάνουν χώρα σε όλο τον κόσμο.

Αναφορικά με τις υπάρχουσες λύσεις για τη καύση της μεθανόλης υπάρχουν εταιρίες μέσα στις οποίες είναι και η MAN Energy Solutions, οι οποίες ξεκίνησαν τα πρώτα τους βήματα στη κατασκευή μηχανών που θα καίνε Μεθανόλη ήδη από το 2013. Συγκεκριμένα την 1 Ιουλίου του 2013 η MAN Diesel & Turbo ανακοίνωσε την ανάπτυξη μιας νέας μηχανής ME-LGI (κινητήρας διπλού καυσίμου) η οποία επιτρέπει την χρήση των πιο βιώσιμων καυσίμων όπως μεθανόλη και υγραέριο (LPG). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κινητήρες αυτοί λειτουργούν με ένα μείγμα μεθανόλης 95% και ένα 5% είναι Ντίζελ.

Αναλυτικότερα, ο κινητήρας της MAN που βασίζεται στην έννοια του κινητήρα ME-LGI, αντί να εγχέει αέριο υψηλής πίεσης, είναι σχεδιασμένος να εγχέει υγρά καύσιμα. Ο κινητήρας ME-LGI, είναι σχεδιασμένος για την μεθανόλη, LPG, αιθέρα διμεθυλίου και

άλλα παρόμοια υγρά καύσιμα σε συνθήκες περιβάλλοντος ή χαμηλής πίεσης, όπως η αμμωνία. Εναλλακτικά μπορεί να συναντήσουμε την ονομασία της ως «ME-LGIM» για τη μεθανόλη και «ME-LGIP» για το LPG. Η έννοια της διπλής καύσης, δηλαδή της διαδικασίας ντίζελ και στα δύο καύσιμα, υγρά και χαμηλού σημείου ανάφλεξης, είναι ίδια με αυτή του κινητήρα ME-GI, και επομένως το MCR και η απόδοση απόκρισης είναι ισοδύναμες με τη σειρά συμβατικών κινητήρων καυσίμου και λειτουργεί χωρίς διαρροή καυσίμου.

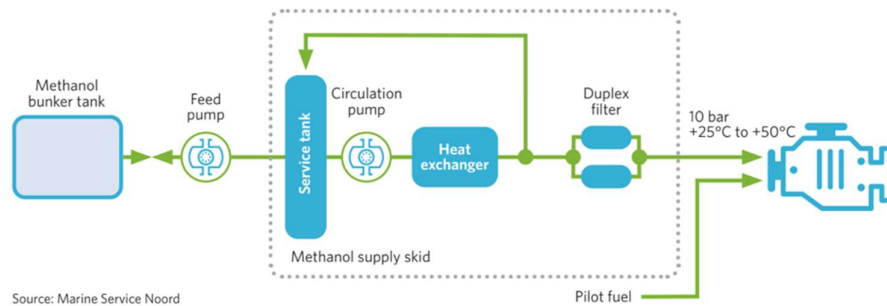
Οι λειτουργίες της μηχανής ME-LGIM μέχρι τη στιγμή της καύσης περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων έγχυτες, δηλαδή βαλβίδες ενίσχυσης καυσίμου για την έγχυση μεθανόλης (FBIV-M) στον θάλαμο καύσης γύρω από το άνω νεκρό σημείο (TDC), υδραυλικά συστήματα ελέγχου της λειτουργίας της βαλβίδας ενίσχυσης καυσίμου, μονάδα παροχής ελαίου στεγανοποίησης τοποθετημένη στον κινητήρα για να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρξει διαρροή μεθανόλης στα κινούμενα μέρη του συστήματος έγχυσης μεθανόλης, διπλότοιχες σωληνώσεις για τη διανομή μεθανόλης στους επιμέρους κυλίνδρους, σύστημα αποστράγγισης και εκκαθάρισης για γρήγορη και αξιόπιστη αφαίρεση της μεθανόλης από τον κινητήρα καθώς και ένα σύστημα ασφαλείας που παρακολουθεί την έγχυση και καύση της μεθανόλης και διασφαλίζει ότι ο κινητήρας θα επιστρέψει σε λειτουργία με πετρέλαιο ντίζελ σε περίπτωση συναγερμών.

Παράλληλα, υπάρχει στο σύστημα και η αμαξοστοιχία βαλβίδων καυσίμου (FVT) που παρέχει λειτουργία διακοπής και αποστράγγισης μεταξύ του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου και του κινητήρα, αλλά και πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα παροχής μεθανόλης με ενσωματωμένο σύστημα αποστράγγισης. (B&W T. M., 2020)

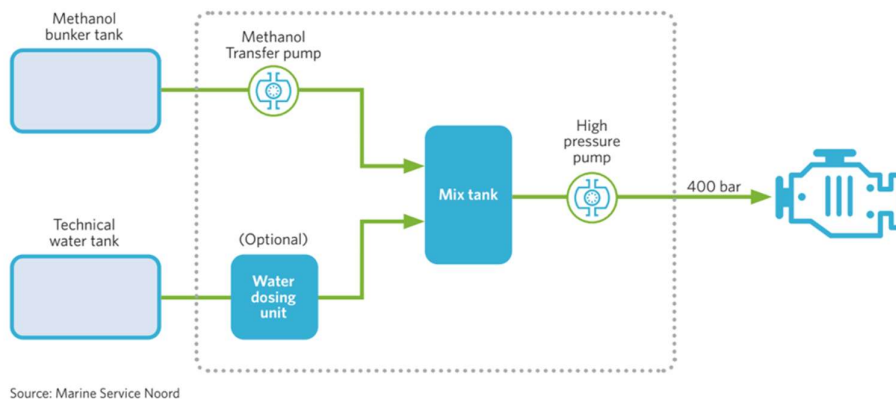
Το σύστημα που έχει αναπτύξει η MAN είναι ένα σύστημα χαμηλής πίεσης που περιλαμβάνει την έγχυση μεθανόλης στον κινητήρα σε περίπου 10 bar και μεταξύ 25°C και 50°C. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα εφοδιασμού καυσίμου λειτουργεί σε σχετικά χαμηλή πίεση (περίπου 10 bar) για να μετακινήσει το καύσιμο από το δοχείο στη μηχανή, όπου προετοιμάζεται (προθερμαίνεται σε ορισμένες περιπτώσεις σε 50°C για βελτιστοποιημένη καύση) πριν εισέλθει στην βαλβίδα έγχυσης καυσίμου (FBIV) σε έως και 300 bar. Από την άλλη πλευρά, η Wärtsilä και άλλοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν μια μέθοδο υψηλής πίεσης όπου η μεθανόλη εισέρχεται στον κινητήρα σε περίπου 400 bar. Αυτό επιτρέπει στο νερό να αναμειγνύεται με το καύσιμο για να παρέχει μια μεθανολο-υδατική διάλυση, μειώνοντας το κόστος και τις εκπομπές.

Τα παρακάτω δύο διαγράμματα αποτυπώνουν τις δύο αυτές λύσεις

Διάγραμμα 20: Περίπτωση Α – 10bar πίεση



Διάγραμμα 21: Περίπτωση Β - 400bar πίεση



Σε υψηλές θερμοκρασίες, δύο μόρια μεθανόλης ($2\text{CH}_3\text{OH}$) συνδυάζονται με τρία μόρια οξυγόνου (3O_2) για να παράγουν τέσσερα μόρια νερού ($4\text{H}_2\text{O}$) και δύο μόρια διοξειδίου του άνθρακα (2CO_2). Αλλά ακόμη και σε συνθήκες καύσης, η μεθανόλη καίγεται πολύ πιο καθαρά από τα ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με το Methanol Institute, «σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, η μεθανόλη που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως και 95%, μειώνει τις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου έως και 80% και εξαλείφει πλήρως τις εκπομπές οξειδίου του θείου και σωματιδίων». Οπότε είναι σίγουρα ένα θετικό βήμα, ακόμα κι αν δεν είναι το εντελώς ιδανικό.

Σε αντίθεση με ότι αναφέρθηκε παραπάνω για τις δίχρονες μηχανές εσωτερικής καύσης, για την αγορά τετράχρονων κινητήρων, η MAN εξακολουθεί να δουλεύει στις τεχνολογίες έγχυσης μεθανόλης τόσο για νέες κατασκευές όσο και για υφιστάμενες κατασκευές μετατροπής (retrofit), με την επιλογή retrofit να έρχεται πρώτη. Αυτό που

ήδη δοκιμάζεται σε μία παραγγελία είναι ένας τετράχρονος κινητήρας 48/60 (διάμετρος 480 mm με διαδρομή 600 mm) που σκοπός είναι να μετατραπεί σε κινητήρα με διάμετρο 510 mm, καθιστώντας τον έναν σχεδιασμό κινητήρα 51/60. Το μέγεθος του κινητήρα 51/60 διπλού καυσίμου είναι πιθανό να είναι το πρώτο τετράχρονο σχέδιο που η MAN θα προσφέρει στη συνέχεια και για νέες κατασκευές. Μάλιστα, σύμφωνα με δηλώσεις της ίδιας της εταιρίας, η εστίαση για τις τετράχρονες μετατροπές θα είναι για την αγορά επιβατηγών πλοίων και ROPAX (roll-on/roll-off επιβατών), με τις πρώτες retrofit μετατροπές να είναι σε κινητήρες σε δύο κρουαζιερόπλοια υπό ένα πιλοτικό πρόγραμμα το 2025 και ένα RO-RO (roll-on/roll-off) πλοίο το 2026.

Κεφάλαιο 4^ο: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ ΣΕ ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟ ΑΡΓΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ

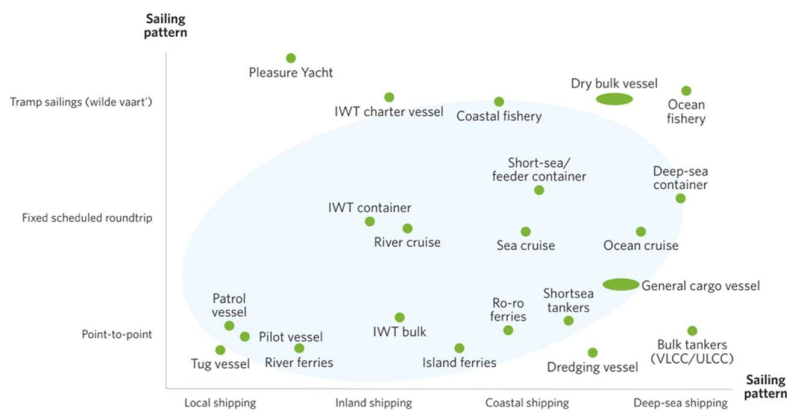
Στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας θα πραγματοποιηθεί μια οικονομοτεχνική μελέτη εφαρμογής της Πράσινης Μεθανόλης στη Ναυτιλία. Η μεθανόλη όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα είναι κατάλληλη για μια ευρεία γκάμα ναυτιλιακών εφαρμογών και κατηγοριών πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των κρουαζιερόπλοιων, των πλοίων μεταφοράς μεγάλων όγκων φορτίων χύμα, των πλοίων εμπορευματοκιβωτίων για κοντινές θαλάσσιες διαδρομές, των φέρι, των τάνκερ αλλά και των πλοίων γενικού φορτίου. Η μεθανόλη δοκιμάζεται και αξιοποιείται ως καύσιμο για τα πλοία εδώ και μερικά χρόνια. Το δεξαμενόπλοιο Lindanger ναυπηγήθηκε το 2015, και το 2016 παραδόθηκε στη νορβηγική ναυτιλιακή εταιρεία Westfal-Larsen, η οποία αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη ναυτιλιακή της Νορβηγίας και ναυλώνει τα πλοία της στη Waterfront Shipping στο Βανκούβερ του Καναδά. Η τελευταία είναι θυγατρική εταιρεία της Methanex Corporation, η οποία – σύμφωνα με την ίδια – αποτελεί τον μεγαλύτερο παραγωγό μεθανόλης παγκοσμίως. Το Lindanger είναι το πρώτο πλοίο με δίχρονο κινητήρα που χρησιμοποιεί καύσιμο μεθανόλης. Άλλα τέτοια πλοία είναι το Mari Boyle, το Mari Jone και το Leikanger – όλα κατασκευασμένα από τη Hyundai.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση εναλλακτικών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένης και της πράσινης μεθανόλης για τις θαλάσσιες μεταφορές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και άλλα, τα οποία περιλαμβάνουν την ασφάλεια, τη δημόσια γνώμη, τη λογιστική, κ.λπ. Από την άλλη, τα κριτήρια για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των εναλλακτικών πηγών ενέργειας για τη ναυτιλία περιλαμβάνουν τις τεχνολογικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικό-πολιτικές πτυχές. Επίσης, η αξιολόγηση των εναλλακτικών καυσίμων για ναυτιλιακές εφαρμογές λαμβάνει υπόψη το κόστος και τα ζητήματα που σχετίζονται με το σύστημα κινητήρα και καυσίμου, την παροχή καυσίμου, τη μείωση εκπομπών και την ασφάλεια καθώς και άλλες έμμεσες δαπάνες. Οι ερευνητές αναφέρουν ότι οι τιμές αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου, η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η περιβαλλοντική ρύθμιση θα μπορούσαν να είναι παράγοντες για τη μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα ναυτιλίας.

Μία ανάλυση των παγκόσμιων τάσεων καυσίμων για τη ναυτιλία έως το 2030 αναφέρει ότι «ένα καύσιμο πρέπει να είναι διαθέσιμο, οικονομικά αποδοτικό, συμβατό με την υπάρχουσα και μελλοντική τεχνολογία και να συμμορφώνεται με τις τρέχουσες και μελλοντικές περιβαλλοντικές απαιτήσεις». Οι διαχειριστές πλοίων μπορεί επίσης να λάβουν υπόψη την περιβαλλοντική πολιτική και τις προσδοκίες των πελατών κατά την εξέταση μιας μετάβασης σε ένα καύσιμο με καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση, όπως η μεθανόλη (Martin Svanberg, 2018).

Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει τη χρήση της μεθανόλης ανά τύπο πλοίου σε διαφορετικούς θαλάσσιους δρόμους και είδη δρομολογίων.

Διάγραμμα 22: Απεικόνιση εφαρμογής της μεθανόλης στους τύπους πλοίων



Source: Green Maritime Methanol, 2021

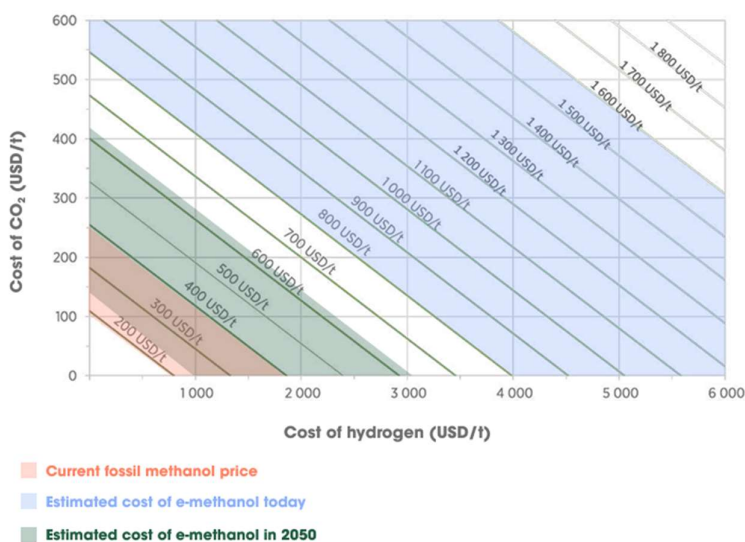
Στην περίπτωση της πράσινης μεθανόλης (βιομεθανόλης ή e-μεθανόλης) δεν έχει υπάρξει ακόμα κάποια εφαρμογή σε πλοία ποντοπόρου ναυτιλίας.

4.1 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ - ΤΙΜΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ

Η μεθανόλη είναι ένα εναλλακτικό καύσιμο όπου από άποψη κόστους είναι φθηνότερη από το υδρογόνο και ακριβότερη από άλλα καύσιμα. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι οι τιμές της γκρι μεθανόλης (συμβατικής) διαφέρουν ανά περιοχή (Ασία, ΗΠΑ και Ευρώπη) αλλά και ανά τύπο αγοράς (για παράδειγμα στην spot αγορά αλλά και στα forward contracts). Οι μέσες τιμές κυμαίνονται από \$327 έως \$366 ανά τόνο στις αγορές spot για τον Φεβρουάριο του 2023 σύμφωνα με το Methanol Institute. Για μεγάλες ποσότητες η τιμή για την ορυκτή μεθανόλη (συμβατική όπως αναφέρθηκε παραπάνω) είναι περίπου 0,3 έως 0,6 USD/L. Ένα λίτρο μεθανόλης έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με 0,13 kg υδρογόνου. Η τιμή για 0,13 kg ορυκτού υδρογόνου

είναι σήμερα περίπου 1,2 έως 1,3 USD για μεγάλες ποσότητες (περίπου 9,5 USD/kg στους σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου). Για μεσαίας κλίμακας ποσότητες (παράδοση σε δοχείο IBC με 1000 L μεθανόλης) η τιμή για την ορυκτή μεθανόλη είναι συνήθως περίπου 0,5 έως 0,7 USD/L, για τη βιομεθανόλη περίπου 0,7 έως 2,0 USD/L και για την e-μεθανόλη από CO₂ περίπου 0,8 έως 2,0 USD/L συν την προκαταβολή για το δοχείο IBC. Ενώ η βιομεθανόλη και η ανανεώσιμη e-μεθανόλη είναι διαθέσιμες στους διανομείς, το πράσινο υδρογόνο συνήθως δεν είναι ακόμη διαθέσιμο στους διανομείς. (Απόστολος Αντωνιάδης, 2022).

Η Κίνα είναι μια χώρα που μπορεί να παράγει βιομεθανόλη και μεθανόλη από ανανεώσιμες πηγές από τις ακόλουθες πρώτες ύλες: βιομάζα, αστικά στερεά και υγρά απόβλητα, διοξείδιο του άνθρακα και ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η μεθανόλη που βασίζεται στη βιομάζα δεν μπορεί να ανταγωνιστεί τη μεθανόλη που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα αναφορικά με την τιμή. Το κόστος παραγωγής της κυμαίνεται από 500 EUR/t έως 600 EUR/t. Από την άλλη, το κόστος παραγωγής της μεθανόλης από ανανεώσιμες πηγές (πράσινη μεθανόλη) που βασίζεται στην αιολική ενέργεια και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινά από 610 EUR/t και ενδέχεται να φτάσει έως και 1520 EUR/t γεγονός που δικαιολογείται από το ότι το κόστος των υποδομών ανεφοδιασμού θα δημιουργήσει πρόσθετα έξοδα για τον καθαρισμό των αποθηκών μεθανόλης στα λιμάνια και τους τερματικούς σταθμούς. Το διάγραμμα παρακάτω αποτυπώνει τη διακύμανση των τιμών μεθανόλης με τον τρόπο παραγωγής της. Αποτυπώνει και το που εκτιμάται ότι θα πάνε οι τιμές της e-μεθανόλης το 2050.

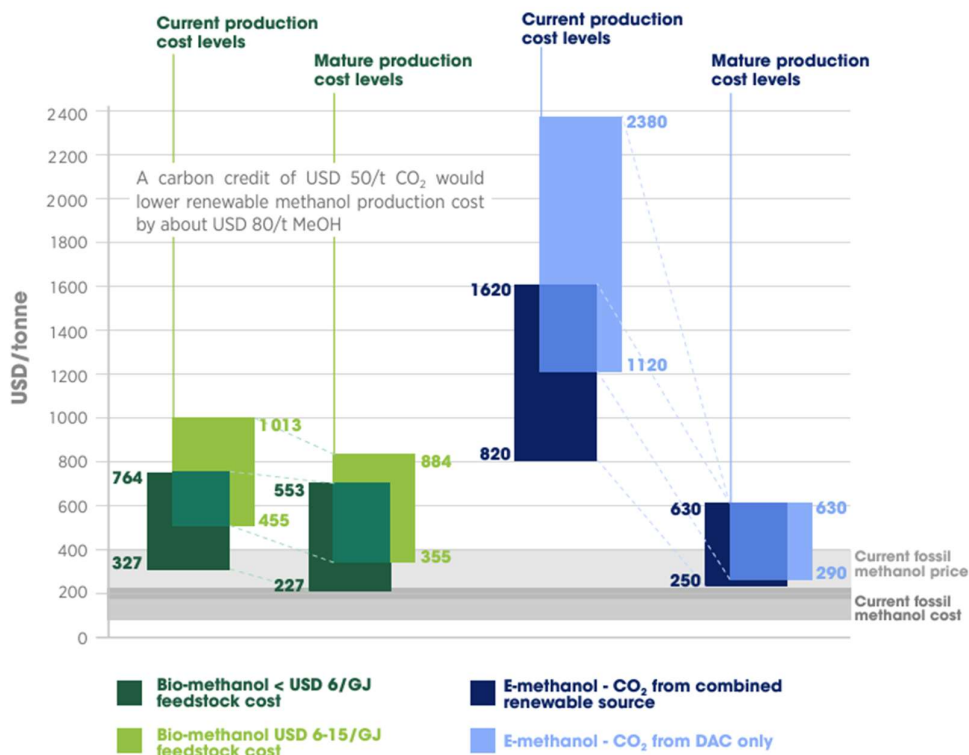


Διάγραμμα 23: Διακύμανση τιμών Μεθανόλης (Methanol Institute)

Επιπρόσθετη μελέτη του Methanol Institute επιβεβαιώνει το υψηλό κόστος της ε-μεθανόλης, τονίζοντας ωστόσο ότι όσο το κόστος αυτό θα μειωθεί με το πέρασ των χρόνων όπου η πράσινη μεθανόλη θα χρησιμοποιείται από τα πλοία, αντικαθιστώντας άλλα καύσιμα. Επομένως το κόστος σήμερα κυμαίνεται από 820-1620 δολάρια ο τόνος ενώ αναμένεται να φτάσει από 250 έως 630 δολάρια ο τόνος. Μέσος όρος σήμερα 1220 δολάρια ο τόνος (Methanol Institute, 2021)

Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει επίσης την εξέλιξη της τιμής της πράσινης μεθανόλης (είτε παραγόμενης από βιομαζα είτε από η ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) σε βάθος χρόνων με τη χαμηλότερη τιμή να φαίνεται να φτάνει και εδώ τα 250 με 290 δολάρια ο τόνος

Διάγραμμα 24: Εξέλιξη τιμής μεθανόλης στη διάρκεια του χρόνου



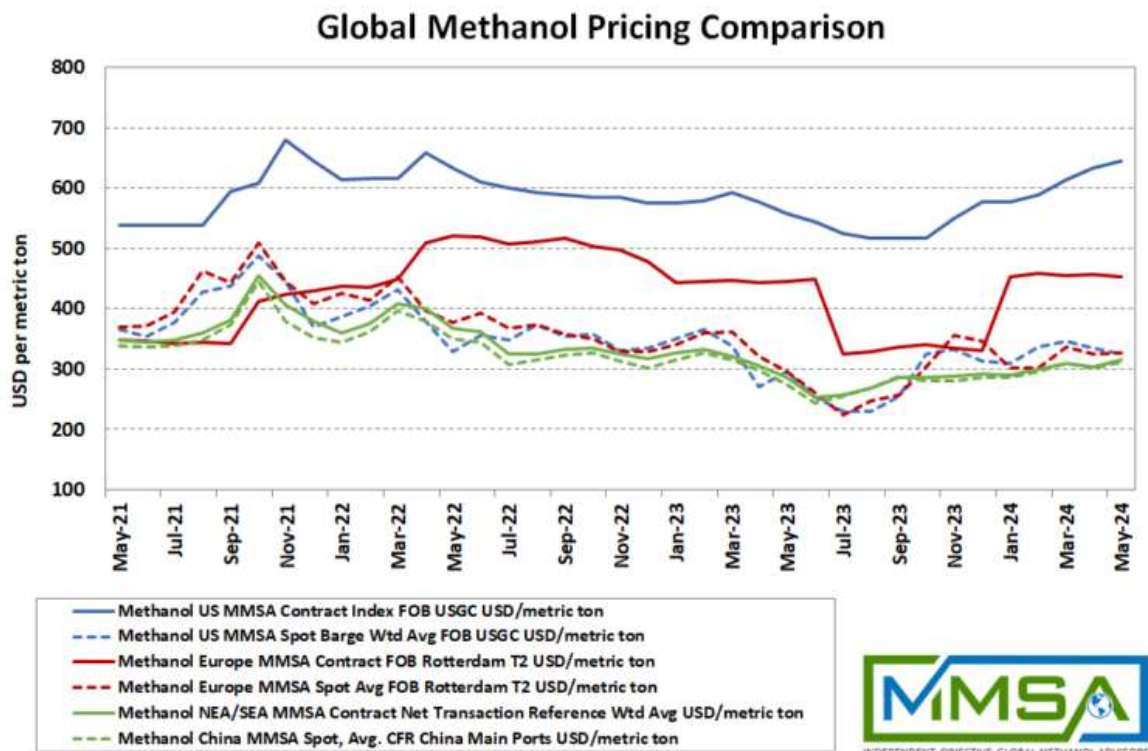
Πηγή: (IRENA, 2021)

Επιπρόσθετα αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ το HFO (πολύ χαμηλού θείου μαζούτ – VLSFO) αγγίζει τα \$600 ανά τόνο, το MGO με την ίδια ή παρόμοια περιεκτικότητα σε θείο ανέρχεται περίπου στα \$876 ανά τόνο και το ενδιάμεσο πετρέλαιο (IFO380) με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο είναι στα \$465 ανά τόνο, η τιμή της μεθανόλης ως

ναυτιλιακού καυσίμου παραμένει δυσμενής χωρίς έναν μηχανισμό τιμολόγησης για να ενθαρρύνει τη χρήση της (LlyodsRegister, 2023).

Το παρακάτω διάγραμμα συγκρίνει τις παγκόσμιες τιμές μεθανόλης σε βασικές περιφερειακές αγορές (ακτή του Κόλπου των Ηνωμένων Πολιτειών, Ρότερνταμ, παράκτια Κίνα) σε βάση διαφορετικών αγορών, spot και συμβολαίων και καλύπτει την περίοδο από το 2019 έως το Μάιο του 2024.

Διάγραμμα 25: Τιμή μεθανόλης σε διαφορετικούς θαλάσσιους δρόμους και αγορές



Πηγή: (Institute, 2024)

Η πράσινη μεθανόλη μπορεί να δείχνει να είναι ένα από τα πιο υποσχόμενα εναλλακτικά καύσιμα, η εκτεταμένη χρήση του οποίου θα μπορούσε να συμβάλλει σημαντικά στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας, καθώς και στην επίτευξη των στόχων του IMO τόσο για το 2030, όσο και για το 2050, ωστόσο σύμφωνα με τα στατιστικά των τελευταίων ετών, η τιμή της είναι οριακά διπλάσια, από αυτή τις γκρι (δηλαδή αυτής που παράγεται από το φυσικό αέριο), γεγονός που δε προξενεί μεγάλη εντύπωση, αφού ο τρόπος παραγωγής της είναι πιο σύνθετος και ακριβός.

Μάλιστα, η αξιολόγηση υψηλού επιπέδου κόστους παραγωγής πράσινης μεθανόλης καθορίζεται από τρεις βασικούς παράγοντες:

- Τις κεφαλαιουχικές δαπάνες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος των βασικών τεχνολογιών
- Τις λειτουργικές δαπάνες που εξαρτώνται από το κόστος της ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, και
- Το κόστος της πρώτης ύλης του βιογενούς CO₂ (Worley, 2022)

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μεγάλης τιμής της πράσινης μεθανόλης, μια λύση για την απαθρακοποίηση της ναυτιλίας που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, είναι η μίξη 50% γκρι και 50% πράσινης μεθανόλης, η οποία δημιουργεί την πορτοκαλί μεθανόλη, που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η λεγόμενη βιομεθανόλη. Η τιμή της πορτοκαλί μεθανόλης κυμαίνεται σε ανταγωνιστικά επίπεδα με αυτή του ορυκτού καυσίμου VLSFO, ενώ παράλληλα συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του well-to-tank³.

Η παρακάτω εικόνα αποτελεί το παγκόσμιο χάρτη και αποτυπώνει τα παγκόσμια έργα βιομεθανόλης (πορτοκαλί) και e-μεθανόλης (πράσινη)

Εικόνα 11: Χάρτης πορτοκαλί και πράσινης μεθανόλης



Πηγή: <https://rawmathub.gr/enimerosi-gia-ti-viosimi-anaptyksi/enallaktika-kafsima/i-methanoli-os-kaysimo-ena-proto-vima-pros-tin-prasini-naftilia>

³ **well-to-tank:** Αναφέρεται σε μια μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενέργειας που κατααλώνεται και των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται από τη στιγμή παραγωγής ενός καυσίμου μεταφοράς (βενζίνη, ντίζελ, ηλεκτρική ενέργεια, φυσικό αέριο) έως τη στιγμή της παροχής καυσίμου (στο σταθμό επαναφόρτισης ή ανεφοδιασμού).

4.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Η μεθανόλη είναι σχετικά άβλαβη από την άποψη της περιβαλλοντικής ρύπανσης σε σύγκριση με άλλα καύσιμα επειδή είναι πλήρως διαλυτή στο νερό και βιοδιασπώμενη. Ως αποτέλεσμα, μια διαρροή μεθανόλης θα είχε πιθανότατα μόνο περιορισμένες επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή εκτός αν παραδοθεί σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις. Το γεγονός ότι η μεθανόλη είναι πλήρως διαλυτή στο νερό σημαίνει ότι θα αραιωθεί εύκολα σε χαμηλές συγκεντρώσεις σε περίπτωση διαρροής στη θάλασσα.

Η μεθανόλη θα διαρκούσε μεταξύ ενός και επτά ημερών στην επιφάνεια του νερού πριν διαλυθεί πλήρως. Ωστόσο, η μεθανόλη είναι τοξική για τους υδρόβιους οργανισμούς σε συγκεντρώσεις άνω των 1.000 mg/l και ειδικότερα άνω των 10.000 mg/l. Είναι χρήσιμο, ωστόσο, να τοποθετήσουμε αυτά τα στοιχεία στο πλαίσιο της σύγκρισης της μεθανόλης με άλλα ναυτιλιακά καύσιμα.

Η συγκέντρωση ενός χημικού παρουσιάζεται συχνά ως Θανατηφόρα Συγκέντρωση με βαθμό 50 ή LC50, η οποία είναι η δόση που είναι θανατηφόρα για το 50% των οργανισμών σε ένα δεδομένο θαλάσσιο πληθυσμό. Σε ένα σώμα νερού, η LC50 των ψαριών για τη μεθανόλη είναι 15.400 mg/l, σε σύγκριση με μόλις 79 mg/l για το HFO. Με άλλα λόγια, εάν όλοι οι άλλοι παράγοντες είναι ίδιοι για τα δύο αυτά καύσιμα τότε θα χρειαζόταν 200 φορές περισσότερη μεθανόλη από ό,τι HFO για να σκοτωθεί ο ίδιος αριθμός ψαριών. Με αυτό το μέτρο της τοξικότητας, άλλα καύσιμα είναι ακόμα πιο θανατηφόρα για τα ψάρια από το HFO και όλα τα καύσιμα είναι πιο τοξικά από τη μεθανόλη. Για παράδειγμα, η LC50 για την αμμωνία είναι μόλις 0,068 mg/l, κάτι που καθιστά την αμμωνία υψηλά τοξική για τα θαλάσσια περιβάλλοντα. (Marquez Carlos, 2023)

Εικόνα 12: Τοξικότητα μεθανόλης για τους θαλάσσιους οργανισμούς



Πηγή: (Marquez Carlos, 2023)

Από την άλλη πλευρά αναφερόμενοι πιο συγκεκριμένα στην πράσινη μεθανόλη και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής, η κλιματική επίπτωση σε επίπεδο WtW (δηλαδή από την παραγωγή μέχρι την καύση) της e-μεθανόλης εξαρτάται κυρίως από τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) κατά την παραγωγή και τη μεταφορά του καυσίμου (WtT) και μόνο. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τη δεξαμενή έως την καύση (TtW) της πράσινης μεθανόλης, e-μεθανόλης είναι οι ίδιες με αυτές της ορυκτής μεθανόλης, επειδή είναι χημικά ίδιες. Άρα αυτό που τις διαφοροποιεί είναι η παραγωγή τους. Η καύση της πράσινης μεθανόλης (ή η χρήση της σε κυψέλη καυσίμου) εξακολουθεί να οδηγεί σε εκπομπές CO₂, αλλά αυτές αντισταθμίζονται από αρνητικές εκπομπές WtT, υπό την προϋπόθεση ότι η πράσινη μεθανόλη παράγεται μόνο με τη χρήση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας. Αν η μεταφορά και η διανομή πραγματοποιούνται με οχήματα μηδενικών εκπομπών, για παράδειγμα με ένα δεξαμενόπλοιο πράσινης μεθανόλης που χρησιμοποιεί το δικό του φορτίο ως καύσιμο, οι εκπομπές GHG από την παραγωγή έως την καύση είναι σχεδόν μηδενικές. Εφόσον η χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική ενέργεια και η πηγή CO₂ δεν είναι ανανεώσιμες και η μεταφορά του καυσίμου εξακολουθούν να μην είναι αποανθρακοποιημένες, μπορούν να προκύψουν εκπομπές GHG στο προφίλ εκπομπών WtW (Nora Wissner, 2023).

Επιπλέον, η καύση μεθανόλης παράγει NO_x, αλλά οι εκπομπές είναι 25% χαμηλότερες από αυτές του HFO ή του MGO. Αν χρησιμοποιηθεί σύστημα ανακύκλωσης καυσαερίων (EGR) ή σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων (επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (SCR)), οι εκπομπές NO_x μπορούν να μειωθούν κατά 80%. Η χρήση των εν λόγω συστημάτων ή η έγχυση νερού (που μειώνει τη θερμοκρασία καύσης) μειώνει τις εκπομπές NO_x σε επίπεδα συμβατά με τα όρια Κανονισμού Tier III του IMO.

Από την άλλη πλευρά και αναφορικά με τις εκπομπές SO_x, οι εκπομπές αυτές παράγονται μέσω της καύσης καυσίμων ή λιπαντικών ελαίων που περιέχουν θείο. Οι εκπομπές σωματιδιακής ύλης (PM) (που συνήθως περιλαμβάνουν μαύρο άνθρακα) είναι αποτέλεσμα ατελούς καύσης καυσίμων και λιπαντικών ελαίων και σε μεγάλο βαθμό καθορίζονται από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο και τέφρα. Η ηλεκτρο-μεθανόλη (πράσινη μεθανόλη) είναι χωρίς θείο, αλλά εκπομπές SO_x και PM μπορεί να προκύψουν μέσω της χρήσης ενός προπειραματικού καυσίμου όπως το MGO ή το HFO και/ή του λιπαντικού ελαίου. Ωστόσο, οι ποσότητες είναι αμελητέες με μείωση 95% έως 98% και πάνω από 90% των SO_x και PM αντίστοιχα σε σύγκριση με

το HFO. Οι εκπομπές PM μπορούν να μειωθούν περαιτέρω με την τροποποίηση του κινητήρα και τις τεχνολογίες επεξεργασίας καυσαερίων (Nora Wissner, 2023)

4.3 ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΕ ΠΛΟΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

Στην ενότητα αυτή θα γίνει επιλογή ενός πλοίου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση (οικονομικά και περιβαλλοντικά) της μεθανόλης (CH₄OH) που παράγεται μέσω φυσικού αερίου (natural gas), της πράσινης μεθανόλης (CH₄OH) - (βιο-μεθανόλη ή/και e-μεθανόλη) με και με το αργό πετρέλαιο (VLSFO – light and Heavy) και το Ντίτζελ (MGO). Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών αυτών καυσίμων θα υπολογιστούν και συγκεκριμένοι περιβαλλοντικοί δείκτες αναφορικά με τους κανονισμούς που αναλύθηκαν σε προηγούμενες ενότητες.

Για το σκοπό της συγκριτικής μελέτης-εφαρμογής έχουν γίνει κάποιες παραδοχές, θα οριστεί ένα πλοίο, καθώς επίσης και το ταξίδι γραμμής που θα εκτελεί καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, μιας και πρόκειται για πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Με αυτό σαν βάση, τα μέχρι σήμερα στοιχεία που υπάρχουν στην διαθέσιμη βιβλιογραφία αλλά και τους υπολογισμούς των ρύπων (GHG), θα αποδειχθεί κατά πόσο και πότε η πράσινη μεθανόλη θεωρείται ή πρόκειται να είναι πιο βιώσιμο καύσιμο τόσο αναφορικά με τις εκπομπές του όσο και οικονομικώς για το συγκεκριμένο πλοίο.

Το πλοίο που έχει επιλεγεί για την συγκεκριμένη μελέτη είναι ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που δραστηριοποιείται τόσο στην Αμερική/Καναδά αλλά και στην Ευρώπη. Πρόκειται για ένα πλοίο μεσαίου μεγέθους που μπορεί να μεταφέρει 3108 TEUs (1408 στα αμπάρια του και 1700 αντίστοιχα στο κατάστρωμα) και η χωρητικότητά του (σε DWT) είναι 42,166 μετρικοί τόνοι. Παράλληλα το ολικό μήκος του (LOA) είναι 220.32 μέτρα και το πλάτος του είναι 32.24 μέτρα. Παράλληλα αναφορικά με την μηχανή του υπό-μελέτη πλοίου, πρόκειται για μια επτακύλινδρη μηχανή της MAN με την ακόλουθη ιπποδύναμη: MCR: 26270kW @ 104RPM και NCR: 87.59% , δηλαδή 23015.5 kW @ 99.5 RPM.

Τα δεδομένα για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών δεικτών αφορούν την περίοδο του 2023 (Ιανουάριος με Δεκέμβριος 2023). Για το σκοπό αυτό, ο παρακάτω πίνακας (**Πίνακας 3**) δείχνει τα ταξίδια του πλοίου που περιεγράφηκε παραπάνω (για την περίοδο αυτή), τις μέσες ταχύτητες του κατά τη διάρκεια των πλεύσεων, το χρόνο παραμονής του στο λιμάνι, τη διάρκεια που παρέμεινε αδρανοποιημένο (αν υπήρχε)

έξω από τα όρια του λιμανιού, καθώς και τις αποστάσεις που διένυσε. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι οι αποστάσεις μεταξύ των λιμένων αναχώρησης και άφιξης υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Netpas Distance 4.0.

Το συγκεκριμένο πλοίο εκτελεί πλόες εντός και εκτός Ευρώπης στο πλαίσιο μιας liner γραμμής και συγκεκριμένα υλοποιεί κυκλικά το ταξίδι Montreal – Halifax – Bremerhaven – Antwerp – Rotterdam. Η επιλογή αυτή έγινε για την συγκεκριμένη μελέτη προκειμένου να υπολογιστούν όλοι οι περιβαλλοντικοί δείκτες, ασχέτως περιοχών πλεύσης του πλοίου, σε Ευρώπη και εκτός αυτής. Το κυκλικό ταξίδι αυτό είναι κατά ένα μέρος του Ευρωπαϊκό και παράλληλα στο πλαίσιο των παραδοχών θεωρούμε ότι και στα τρία λιμάνια το πλοίο εκτελεί φορτοεκφόρτωση. Επιπλέον, θεωρούμε ότι το πλοίο ανεφοδιάζεται με καύσιμο κάθε φορά που βρίσκεται Ευρώπη.

Οι δείκτες που θα υπολογιστούν αφορούν τους κανονισμούς IMO DCS & CII, EU ETS, και FuelEU Maritime, ενώ για το σκοπό της σύγκρισης της πράσινης μεθανόλης με άλλα καύσιμα θα χρησιμοποιηθούν και κάποια οικονομικά στοιχεία.

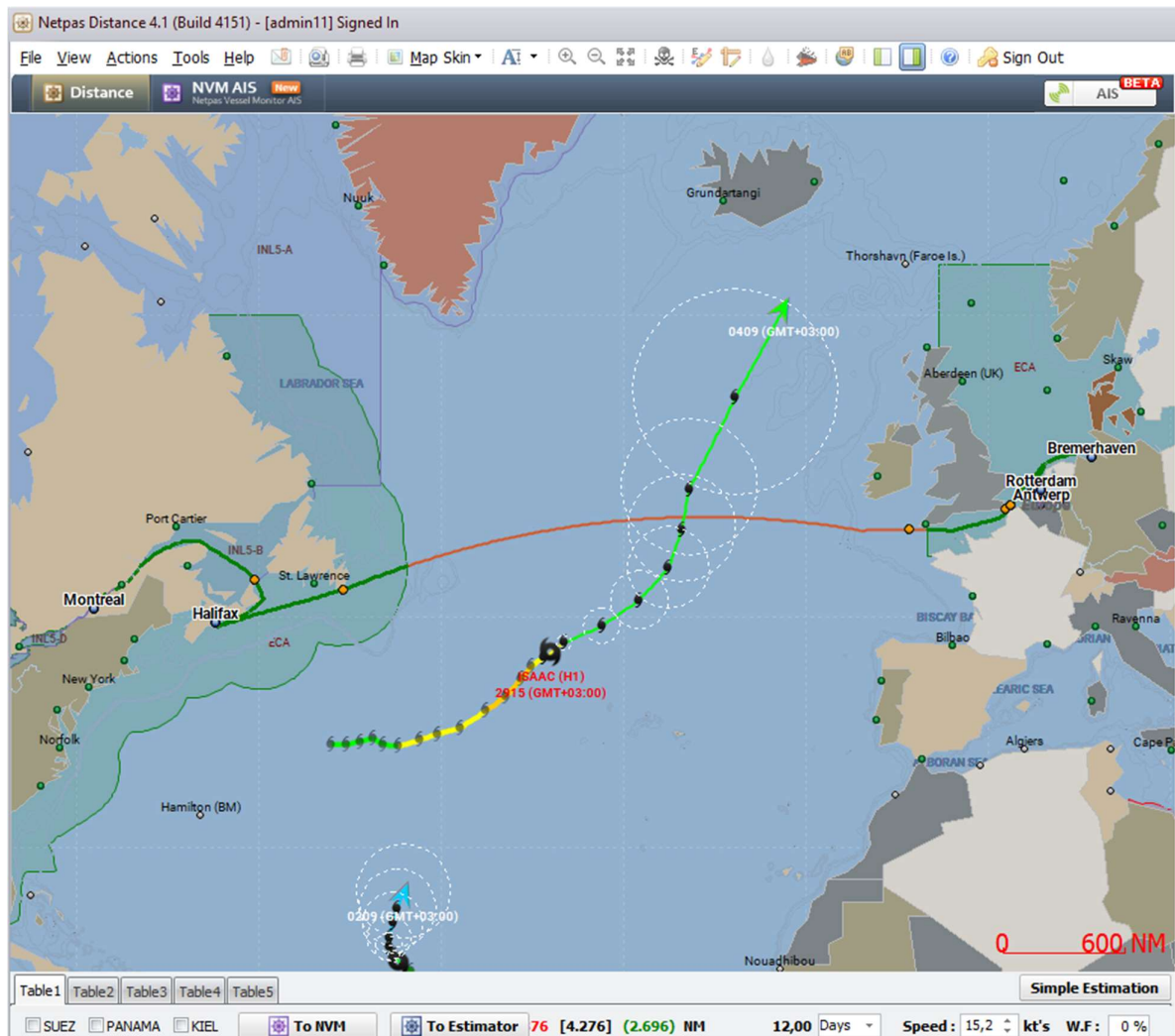
Αρχικά οι υπολογισμοί θα γίνουν για το αργό πετρέλαιο (VLSFO), στη συνέχεια οι ίδιοι υπολογισμοί για τα υπόλοιπα καύσιμα όπως ορίστηκαν παραπάνω, ενώ στο τέλος θα γίνει η αξιολόγησή τους. Σημειώνεται ότι ο μόνος κανονισμός που λαμβάνει WtW όλους τους ρύπους και αξιολογεί το καύσιμο ως προς όλα τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG) είναι αυτός του FuelEU σε αντίθεση με όλους του άλλους που λαμβάνουν υπόψη μόνο το CO₂ και επιπλέον αφορούν μόνο στο κομμάτι του TtW. Αρχική παράμετρος για τον υπολογισμό όλων αυτών των δεικτών είναι να υπολογίσουμε την κατανάλωση του καυσίμου για το εκάστοτε συγκεκριμένο ταξίδι.

Πίνακας 3: Πίνακας παράθεσης στοιχείων εμπορικών ταξιδιών πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

| Ταξίδι | Λιμάνι Αναχώρησης | Λιμάνι Αφίξης | Ταχύτητα (knots) | Πλεύσιμες Μέρες | Πλεύσιμες μέρες (ECA) | Μέρες Λιμάνι | Απόσταση (nm) | Απόσταση ECA (nm) |
|----------------|------------------------|------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------------|
| 1 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 2 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 3 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 4 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 5 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 6 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 7 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 8 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 9 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 10 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 11 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 12 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 13 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 |
| 14 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 |
| Σύνολο: | | | | 119,95 | 153,14 | 83,8 | 45321 | 56135 |

Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει μέσω του προγράμματος Netpas το κυκλικό ταξίδι που υλοποιεί το πλοίο της εν λόγω μελέτης.

Εικόνα 13: Αποτύπωση του κυκλικού ταξιδιού – Θαλάσσιες διαδρομές - Πηγή: (Netpas, 2024)



Για τη δημιουργία του παραπάνω πίνακα αλλά και για τους υπολογισμούς που ακολουθούν έχουν γίνει κάποιες παραδοχές, οι οποίες παρατίθενται ακολούθως παράλληλα με τους εκάστοτε υπολογισμούς.

Αρχικά για λόγους διευκόλυνσης υλοποίησης της μελέτης και σύγκρισης, επειδή αναφερόμαστε σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που εκτελεί το ίδιο ταξίδι όλο το χρόνο κάτω από τον ίδιο ναυλωτή, ότι οι συνθήκες υλοποίησης των ίδιων ταξιδιών (π.χ. Halifax – Bremerhaven ή Antwerp – Rotterdam) είναι οι ίδιες άρα ίδιες θα είναι και οι μέρες πλεύσεις, οι μέσες ταχύτητες κπ. Επιπλέον παραδοχή είναι ότι οι καθυστερήσεις στα λιμάνια ή μέρες αδράνειας του πλοίου είναι σύνολο 9 μέρες.

Παράλληλα στις πλευσιμες μέρες συμπεριλαμβάνεται και ο χρόνος που απαιτείται για την προσέγγιση (maneuvering in/out) του πλοίου στο λιμάνι αλλά και η πλαγιοδέτηση/άπαρση (berthing/unberthing) του πλοίου.

Επιπρόσθετα, μια ακόμα παραδοχή έχει να κάνει με την κατανάλωση καυσίμου. Στην προκειμένη περίπτωση μελέτης τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψει ο πίνακας των ταξιδιών και των καταναλώσεων είναι από πραγματικά στοιχεία της Ναυτιλιακής Εταιρίας, EUROBULK LTD και δεν αποτελούν προσωπική ιδιοκτησία. Παράλληλα αξίζει να αναφερθεί ότι όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα excel.

Επιπλέον, ο μέσος όρος ταχύτητας είναι επίσης πραγματικό νούμερο για τα συγκεκριμένα ταξίδια (16,00 κόμβοι) και το συγκεκριμένο πλοίο καίει περίπου 45 μετρικούς τόνους στην κύρια μηχανή την ημέρα και 7 τόνους ημερησίως στις ηλεκτρογεννήτριες, ενώ για τις υπόλοιπες ταχύτητες ισχύουν οι ακόλουθοι συνδυασμοί.

Πίνακας 4: Συνδυασμοί Ταχύτητας και Κατανάλωσης ορισμένου πλοίου

| Ταχύτητα | Κατανάλωση (Κύρια Μηχανή) | Κατανάλωση (Ηλεκτρογεννήτριες) |
|------------------------|--------------------------------------|---|
| 12 (+/- 0.5 kn) | 27 | 4.5 |
| 13 (+/- 0.5 kn) | 30 | 4.5 |
| 14 (+/- 0.5 kn) | 33 | 4.5 |
| 15 (+/- 0.5 kn) | 38.5 | 4.5 |
| 16 (+/- 0.5 kn) | 45 | 4.5 |
| 17 (+/- 0.5 kn) | 50 | 4.5 |

Πηγή: Εμού του ιδίου

Στη συνέχεια αξίζει να αναφερθεί ότι από τις συνολικές πλευσιμες μέρες του κάθε ταξιδιού, υπάρχουν μέρες όπου το πλοίο βρίσκεται σε ECA (Emission Control Areas) που σημαίνει ότι θα καίει MGO αντί για VLSFO. Παράλληλα το ίδιο καύσιμο θα καίει και στα λιμάνια μιας και στη συγκεκριμένη μελέτη όλα τα λιμάνια (είτε Αμερική/Καναδά είτε Ευρώπη) είναι μέσα σε ECA. Αναλυτικότερα, οι καταναλώσεις ανά ταξίδι διαμορφώνονται, σύμφωνα με τον επόμενο πίνακα ως εξής:

| Ταξίδι | Κατανάλωση Καυσίμου εν πλώ (MT) | Κατανάλωση Καυσίμου εν πλώ ECA (MT) | Κατανάλωση Καυσίμου Λιμάνι (MT) | Συνολική Κατανάλωση Καυσίμου (MT) |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 2 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 3 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 4 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 5 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 6 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 7 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 8 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 9 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 10 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 11 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 12 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 13 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 |
| | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 |
| | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 |
| 14 | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 |
| | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 |
| Σύνολα: | | | | 12651,215 |
| Κατανάλωση Δόρανης | | | | 40,5 |
| | | | | 12691,715 |

Πίνακας 5: Καταναλώσεις ανά ταξίδι και σε λιμάνι για το πλοίο μελέτης

Πηγή: Εμού του ιδίου

MT

MT

MT

Στη συνέχεια με βάση τον παραπάνω πίνακα θα πρέπει να υπολογίσουμε πόσοι από τους συνολικούς τόνους που έκαψε το συγκεκριμένο πλοίο τόσο εν πλω όσο και στα λιμάνια είναι VLSFO και πόσοι MGO.

$$\text{Κατανάλωση ECA + Port Stay (MGO)} = 7135,28 \text{ MT}$$

$$\text{Κατανάλωση VLSFO} = 5556.43 \text{ MT}$$

Συνολική Κατανάλωση:

$$\text{VLSFO \& MGO} = 12691.71 \text{ MT}$$

Ο πίνακας που ακολουθεί αποτυπώνει τη σχέση κατανάλωσης με απόσταση (κατανάλωση/ναυτικό μίλι) τόσο για το VLSFO όσο και το MGO για το πρώτο κυκλικό ταξίδι του εν λόγω πλοίου. Η ίδια σχέση ισχύει και για τα υπόλοιπα κυκλικά ταξίδια μιας και έχουμε υποθέσει ότι η κατανάλωση ανά κυκλικό ταξίδι είναι ίδια. Απαιτούνται περίπου 13 με 14 ίδια κυκλικά ταξίδια για να ολοκληρωθεί ένας χρόνος.

Πίνακας 6: Πίνακας αναλογίας καυσίμου ανά ναυτικό μίλι

| Ταξίδι | Λιμάνι Αναχώρησης | Λιμάνι Αφίξης | Ταχύτητα (knots) | Πλεύσιμες Μέρες | Πλεύσιμες μέρες (ECA) | Μέρες Λιμάνι | Απόσταση (nm) | Απόσταση ECA (nm) | Συνολική Απόσταση | Συνολική Κατανάλωση Καυσίμου (MT) | Κατανάλωση/Ναυτικό μίλι (VLSFO) | Κατανάλωση /Ναυτικό μίλι (MGO) |
|--------|------------------------|------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 15,2 | 0 | 2,59 | 1,5 | 0 | 946 | 946 | 118,12 | 0,000 | 0,125 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 16 | 4,38 | 3,39 | 1,7 | 1680 | 1304 | 2984 | 392,265 | 0,129 | 0,135 |
| | Bremenhaven Germany | Antwerp, Belgium | 13 | 0 | 1,05 | 0,5 | 0 | 328 | 328 | 38,475 | 0,000 | 0,117 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 12,3 | 0 | 0,4 | 1,2 | 0 | 119 | 119 | 18 | 0,000 | 0,151 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 15,5 | 4,51 | 3,89 | 1,3 | 1677 | 1448 | 3125 | 367,05 | 0,116 | 0,120 |

Πηγή: Εμού του ίδιου

4.3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ

Έχοντας τις καταναλώσεις του πλοίου για όλο το έτος του 2023 τις οποίες χρησιμοποιούμε ως δεδομένες (ίδιες) για τα επόμενα χρόνια, καθώς και τις ποσότητες για κάθε ένα από τα είδη του καυσίμου (πετρελαίου για αρχή) που καίει το συγκεκριμένο, υπό μελέτη, πλοίο ο πρώτος περιβαλλοντικός δείκτης που θα υπολογίσουμε είναι το **CH**.

Οι εκπομπές CO₂ για το συνολικό VLSFO και MGO που καταναλώνει το συγκεκριμένο πλοίο θα υπολογιστούν λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συντελεστές για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ είναι 3,114 και 3,206 αντίστοιχα για κάθε ένα είδος καυσίμου και άρα προκύπτει ότι:

$$CO2\ VLSFO = VLSFO\ Consumption * Cf\ VLSFO \Rightarrow$$

$$CO2\ VLSFO = 5556.43 * 3.114 = 17,302.72\ MT$$

Και αντίστοιχα,

$$CO2\ MGO = MGO\ Consumption * Cf\ MGO \Rightarrow$$

$$CO2\ MGO = 7135.28 * 3.206 = 22,875.71\ MT$$

Άρα το συνολικό CII για το 2024 θα είναι:

$$\begin{aligned} CII &= \frac{Total\ CO2\ Emissions}{DWT * Distance} = \frac{17,302,72 + 22,875,71}{42,166 * 101,456} = \frac{40,178.43}{4,277,993,696} * 10^6 \\ &= \frac{40,178,430,000}{4,277,993,696} = \mathbf{9.391} \frac{grCO2}{dwt * nm} \end{aligned}$$

Για να μπορέσουμε να δούμε αν το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου δείκτη είναι αποδεκτό από τον κανονισμό θα πρέπει να υπολογιστεί το επιθυμητό CII (Required CII) για το 2023 αρχικά και μετά για τα επόμενα χρόνια.

Για να μπορέσουμε όμως να υπολογίσουμε το Required CII πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε σύμφωνα με τον κανονισμό το CII Reference, το οποίο σύμφωνα με την MEPC 78/17/Add.1, Annex 15, σελίδα 4, πίνακας 1, για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αναφέρει:

Σταθερές: $\alpha = 1984$ και $c = 0.489$

Εικόνα 14: Παράετροι για τον υπολογισμό του CII Reference

Table 1: Parameters for determining the 2019 ship type specific reference lines

| Ship type | | Capacity | a | c |
|------------------------------------|---|----------|----------|--------|
| Bulk carrier | 279,000 DWT and above | 279,000 | 4745 | 0.622 |
| | less than 279,000 DWT | DWT | 4745 | 0.622 |
| Gas carrier | 65,000 and above | DWT | 14405E7 | 2.071 |
| | less than 65,000 DWT | DWT | 8104 | 0.639 |
| Tanker | | DWT | 5247 | 0.610 |
| Container ship | | DWT | 1984 | 0.489 |
| General cargo ship | 20,000 DWT and above | DWT | 31948 | 0.792 |
| | less than 20,000 DWT | DWT | 588 | 0.3885 |
| Refrigerated cargo carrier | | DWT | 4600 | 0.557 |
| Combination carrier | | DWT | 5119 | 0.622 |
| LNG carrier | 100,000 DWT and above | DWT | 9.827 | 0.000 |
| | 65,000 DWT and above, but less than 100,000 DWT | DWT | 14479E10 | 2.673 |
| | less than 65,000 DWT | 65,000 | 14779E10 | 2.673 |
| Ro-ro cargo ship (vehicle carrier) | 57,700 GT and above | 57,700 | 3627 | 0.590 |
| | 30,000 GT and above, but less than 57,700 GT | GT | 3627 | 0.590 |
| | Less than 30,000 GT | GT | 330 | 0.329 |
| Ro-ro cargo ship | | GT | 1967 | 0.485 |
| Ro-ro passenger ship | Ro-ro passenger ship | GT | 2023 | 0.460 |
| | High-speed craft designed to SOLAS chapter X | GT | 4196 | 0.460 |
| Cruise passenger ship | | GT | 930 | 0.383 |

Πηγή: (MEPC 78/17/Add.1 Annex 15, 2022)

Άρα προκύπτει ότι:

$$Reference\ CII = \alpha \times DWT^{-c} = 1984 \times 42166^{-0,489} = 10,862 \frac{grCO2}{DWT * NM}$$

Άρα για το έτος 2023 για τον υπολογισμό του επιθυμητού επιπέδου CII θα ισχύει:

$$Required\ CII = \left(1 - \frac{Z}{100}\right) \times Reference\ CII = 0,95 \times 10,862 = 10,318 \frac{grCO2}{DWT * NM}$$

Όπου Z ο συντελεστής μείωσης υπολογιζόμενος σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα από τον κανονισμό:

Εικόνα 15: Υπολογισμός του συντελεστή μείωσης

Table 1: Reduction factor (Z%) for the CII relative to the 2019 reference line

| Year | Reduction factor relative to 2019 |
|------|-----------------------------------|
| 2023 | 5%* |
| 2024 | 7% |
| 2025 | 9% |
| 2026 | 11% |
| 2027 | - ** |
| 2028 | - ** |
| 2029 | - ** |
| 2030 | - ** |

Note:

- * Z factors of 1%, 2% and 3% are set for the years of 2020 to 2022, similar as business as usual until entry into force of the measure.
- ** Z factors for the years of 2027 to 2030 to be further strengthened and developed taking into account the review of the short-term measure.

Πηγή: (MEPC 76/15 Add.2 Annex12, 2021)

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω το επιθυμητό όριο για το 2024 θα είναι αντίστοιχα 10,102 grCO₂/DWT*nm. Αυτό σημαίνει ότι το αποτέλεσμα του CII για το συγκεκριμένο πλοίο είναι κάτω από το επιθυμητό/επιτρεπτό επίπεδο, είναι δηλαδή καλύτερο και η βαθμολογία του πλοίου είναι «B», που σημαίνει ότι το πλοίο είναι Compliant με τον κανονισμό όταν καίει VLSFO/MDO σε αυτή την αναλογία. Ο υπολογισμός και η βαθμολογία (rating), προκύπτουν από στους κανονισμούς του IMO σύμφωνα με την MEPC 76 & 78 του 2021 και 2022 αντίστοιχα για τον υπολογισμό του δείκτη CII. ⁴

Μάλιστα όπως αναφέρει το παράρτημα G4 τα όρια μεταξύ των βαθμολογιών A, B, C, D και E δεν είναι τυχαία αλλά προκύπτουν ως ακολούθως:

$$\text{Superior Boundary} = \exp(d1) * \text{Required CII}$$

$$\text{Lower Boundary} = \exp(d2) * \text{Required CII}$$

$$\text{Upper boundary} = \exp(d3) * \text{Required CII}$$

$$\text{Inferior Boundary} = \exp(d4) * \text{Required CII}$$

⁴ <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/seemp-mepc78-353.pdf> (Guidelines G2)
<https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/seemp-mepc78-354.pdf> (Guidelines G4)

Όπου τα d1, d2, d3 & d4 είναι σταθερές για τον υπολογισμό των ορίων του επιθυμητού ορίου οπού λαμβάνουμε αυτούσιες από τον κανονισμό MEPC 78/17/Add/1 Annex 16, σελίδα 6, πίνακας 1 όπως φαίνεται παρακάτω:

Εικόνα 16: Πίνακας σταθερών για τον υπολογισμό της βαθμολογίας του πλοίου αναφορικά με το CII

Table 1: *dd* vectors for determining the rating boundaries of ship types

| Ship type | Capacity in CII calculation | <i>dd</i> vectors (after exponential transformation) | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|--|---------|---------|---------|------|
| | | exp(d1) | exp(d2) | exp(d3) | exp(d4) | |
| Bulk carrier | DWT | 0.86 | 0.94 | 1.06 | 1.18 | |
| Gas carrier | 65,000 DWT and above | DWT | 0.81 | 0.91 | 1.12 | 1.44 |
| | less than 65,000 DWT | DWT | 0.85 | 0.95 | 1.06 | 1.25 |
| Tanker | DWT | 0.82 | 0.93 | 1.08 | 1.28 | |
| Container ship | DWT | 0.83 | 0.94 | 1.07 | 1.19 | |
| General cargo ship | DWT | 0.83 | 0.94 | 1.06 | 1.19 | |
| Refrigerated cargo carrier | DWT | 0.78 | 0.91 | 1.07 | 1.20 | |
| Combination carrier | DWT | 0.87 | 0.96 | 1.06 | 1.14 | |
| LNG carrier | 100,000 DWT and above | DWT | 0.89 | 0.98 | 1.06 | 1.13 |
| | less than 100,000 DWT | | 0.78 | 0.92 | 1.10 | 1.37 |
| Ro-ro cargo ship (vehicle carrier) | GT | 0.86 | 0.94 | 1.06 | 1.16 | |
| Ro-ro cargo ship | GT | 0.76 | 0.89 | 1.08 | 1.27 | |
| Ro-ro passenger ship | GT | 0.76 | 0.92 | 1.14 | 1.30 | |
| Cruise passenger ship | GT | 0.87 | 0.95 | 1.06 | 1.16 | |

Πηγή: (MEPC78/17/Add/1, 2022)

Και για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι $\exp(d1) = 0,83$, $\exp(d2) = 0,94$, $\exp(d3) = 1,08$ και $\exp(d4) = 1,19$. Άρα για τα όρια για το 2024 προκύπτουν τα ακόλουθα:

$$\text{Superior Boundary} = \exp(d1) * \text{Required CII} = 0,83 * 10,102 = 8,384$$

(Ό,τι λιγότερο από αυτό οδηγεί σε βαθμολογία A)

$$\text{Lower Boundary} = \exp(d2) * \text{Required CII} = 0,94 * 10,102 = 9,495$$

(Ό,τι μεγαλύτερο από το Superior Boundary και λιγότερο Lower Boundary οδηγεί σε βαθμολογία B)

$$\text{Required CII} = 10.102 \text{ (η μέση για το C)}$$

$$\text{Upper boundary} = \exp(d3) * \text{Required CII} = 1,08 * 10,102 = 10,910$$

(Ό,τι μεγαλύτερο από το Lower Boundary και λιγότερο Upper boundary οδηγεί σε βαθμολογία C)

$$\text{Inferior Boundary} = \exp(d4) * \text{Required CII} = 1,19 * 10,102 = 12,021$$

(Ό,τι μεγαλύτερο από το Upper boundary και λιγότερο Inferior Boundary οδηγεί σε βαθμολογία D)

(Ό,τι μεγαλύτερο από το Inferior boundary οδηγεί σε βαθμολογία E)

Άρα για το 2024 οποιοδήποτε CII πετύχει το πλοίο και το οποίο είναι από 10,910 grCO2/dwt*nm και κάτω θα είναι αποδεκτό.

Ο κανονισμός όμως του CII δεν παραμένει σταθερός στη διάρκεια των ετών. Αλλάζει με ένα συντελεστή 2-3% το χρόνο. Για τα έτη μελέτης 2024, 2025 και 2026 οι συντελεστές αυτοί είναι το 2024: 7%, το 2025: 9% και το 2026: 11%. Σημειώνεται ότι η βάση του κανονισμού βρίσκεται στο έτος 2019⁵. Από εκεί και έπειτα δεν γνωρίζουμε μέσω βιβλιογραφίας πως θα αλλάξει/μεταβληθεί το ποσοστό αυτό και αν πρόκειται να αλλάξει ή να παραμείνει σταθερό μιας και περιμένουμε πιθανή αναθεώρηση του κανονισμού, ωστόσο θα θεωρήσουμε μια συνεχόμενη αύξηση του κατά 2% μέχρι το 2030 και μέχρι το 2050 αντίστοιχα. Είναι προφανές όμως ότι και τα όρια θα αλλάζουν κάθε φορά για τη βαθμολογία του πλοίου δεδομένου της αλλαγής του επιθυμητού επιπέδου CII. Η παρακάτω εικόνα δείχνει το πώς αλλάζει η βαθμολογία του πλοίου στη πάροδο των ετών ανάλογα με το πώς αλλάζει το επιθυμητό επίπεδο του δείκτη και τα όρια του.

Εικόνα 17: Μεταβολή του δείκτη (βαθμολογία) στη πάροδο των ετών

| | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030-2050 |
|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| ATTAINED CII | 9,931 | 9,931 | 9,931 | 9,931 | 9,931 | 9,931 | 9,931 |
| REQUIRED CII | 10,102 | 9,885 | 9,668 | 9,449 | 9,332 | 9,015 | 8,798 |

| exp(d1) | exp(d2) | exp(d3) | exp(d4) |
|---------|---------|---------|---------|
| 0,83 | 0,94 | 1,08 | 1,19 |

$$\left. \begin{aligned} \text{superior boundary} &= \exp(d_1) \cdot \text{required CII} \\ \text{lower boundary} &= \exp(d_2) \cdot \text{required CII} \\ \text{upper boundary} &= \exp(d_3) \cdot \text{required CII} \\ \text{inferior boundary} &= \exp(d_4) \cdot \text{required CII} \end{aligned} \right\}$$

| | | | | | | | |
|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|
| Superior | 8,38466 | 8,20455 | 8,02444 | 7,84267 | 7,74556 | 7,48245 | 7,30234 |
| Lower | 9,49588 | 9,2919 | 9,08792 | 8,88206 | 8,77208 | 8,4741 | 8,27012 |
| Upper | 10,91016 | 10,6758 | 10,4414 | 10,20492 | 10,07856 | 9,7362 | 9,50184 |
| Inferior | 12,02138 | 11,76315 | 11,5049 | 10,20492 | 11,10508 | 10,7279 | 10,46962 |
| | B | C | C | C | C | C | D ή E |

Πηγή: Εμού του ιδίου

Με δεδομένο την αύξηση του συντελεστή που καθορίζει το επιτρεπτό και το επιθυμητό επίπεδο για το εκάστοτε πλοίο, αν θεωρήσουμε ότι το πλοίο έχει τις ίδιες καταναλώσεις

⁵ <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/seemp-mepc338-76.pdf> (Guidelines G3)

το 2024, 2025 και το 2026 και μέχρι το τελευταίο έτος μελέτης που θεωρούμε το 2050 και υποθέτοντας ότι ο συντελεστής Z έχει πρόκειται να έχει τον ίδιο ρυθμό μεταβολής τα τελικά αποτελέσματα αναφορικά με τη βαθμονόμηση του CII θα είναι:

Πίνακας 7: Συγκεντρωτικό Πίνακας για τον κανονισμό του CII

| Έτος | REF. CII grCO2/DWT*nm | REQUIRED CII grCO2/DWT*nm | ACTUAL CII grCO2/DWT*nm | Z | (1-Z/100) | RATE |
|-----------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|-----|-----------|---------------------|
| 2024 | 10.862 | 10,102 | 9,391 | 7% | 0.93 | (B) |
| 2025 | 10.862 | 9,885 | 9,391 | 9% | 0.91 | (C) |
| 2026 | 10.862 | 9,668 | 9,391 | 11% | 0.89 | (C) |
| 2027 | 10.862 | 9.449 | 9,391 | 13% | 0.87 | (C) |
| 2028 | 10.862 | 9.232 | 9,391 | 15% | 0.85 | (D) |
| 2029 | 10.862 | 9.015 | 9,391 | 17% | 0.83 | (D) |
| 2030-2050 | 10.862 | 8.798 | 9,391 | 19% | 0.81 | (D) ή/και (E) |

Πηγή: Εμού του ιδίου

Η βαθμονόμηση του πλοίου αναφορικά με το CII, παρατηρούμε ότι δυσχεραίνει αρκετά με την πάροδο του χρόνου αν θεωρήσουμε ότι το πλοίο δεν κάνει κάποια αλλαγή ούτε ως προς τους ρύπους του (άρα και τις καταναλώσεις του) αλλά ούτε και ως προς το design του (π.χ. εγκατάσταση Energy Efficiency Devices- ESDs). Γενικά ο δείκτης αυτός δεν έχει ως σκοπό την αλλαγή κατεύθυνσης των πλοιοκτητών ως προς το είδος του καυσίμου που επιλέγουν να καταναλώνουν τα πλοία τους, ούτε και τους επιβάλει κάποιο πρόστιμο, αλλά περισσότερο μπορεί να επηρεάσει την εμπορική εικόνα του πλοίου με την προτίμηση των ναυλωτών να παραμένει προς τα πλοία με καλύτερο δείκτη.

Στη συνέχεια ο επόμενος περιβαλλοντικός δείκτης που θα υπολογίσουμε είναι το **EU ETS** ώστε να δούμε με βάση τις καταναλώσεις του εν λόγω πλοίου και του συγκεκριμένου δρομολογίου που ακολουθεί καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, ποιο είναι το κόστος που πρέπει να πληρώσει στην Ευρώπη ως φόρο (TAX) για τους ρύπους του. Σημειώνεται εδώ ότι και για τον κανονισμό αυτό όπως και στο CII λαμβάνονται υπόψη

οι ρύποι μόνο στο κομμάτι TtW και όχι WtT & TtW. Επιπλέον, σύμφωνα με τον κανονισμό για τα εμπορικά/επιβατηγά πλοία από το 2026 και μετά θα υπολογίζονται όλοι οι ρύποι που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (GHGs ρύποι).

Για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου δείκτη το πρώτο βήμα που έγινε είναι από τον πίνακα των ταξιδιών του συγκεκριμένου πλοίου (**πίνακας 3 παραπάνω**) να εντοπιστούν τα ευρωπαϊκά ταξίδια και να καθοριστεί ποια από αυτά είναι προς την Ευρώπη, από την Ευρώπη, μέσα στην Ευρώπη (παραμονή σε ευρωπαϊκό λιμάνι) και μεταξύ Ευρωπαϊκών Λιμανιών. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι ρύποι διοξειδίου του άνθρακα με ποσοστό 50% για τα ταξίδια από και προς Ευρώπη και 100% για τα ταξίδια που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ ευρωπαϊκών λιμένων και μέσα στο Ευρωπαϊκό λιμάνι. Το συγκεκριμένο πλοίο σε ένα κυκλικό ταξίδι περνάει από τρία Ευρωπαϊκά Λιμάνια (Ρότερνταμ, Αμβέρσα και Βρέμη). Άρα αν γίνει ο υπολογισμός για το πρώτο κυκλικό ταξίδι τότε η ίδια διαδικασία (υπολογισμός) ακολουθείται και για όλη τη χρονιά αφού πρόκειται για πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που ακολουθεί τον ίδιο κύκλο ταξιδιού όλο το χρόνο. Ο υπολογισμός των ρύπων έγινε πολλαπλασιάζοντας την κατανάλωση στην εκάστοτε κατηγορία Ευρωπαϊκού ταξιδιού (από/προς Ευρώπη, μεταξύ Ευρωπαϊκών Λιμένων και μέσα σε Ευρωπαϊκό Λιμάνι) επί τον αντίστοιχο συντελεστή για τον υπολογισμό του CO₂ ($C_fVLSFO = 3.114$ & $C_fMGO = 3.206$).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο κανονισμός τέθηκε πρώτη φορά σε ισχύ το 2024 και η αξιολόγηση του θα πραγματοποιηθεί τον Απρίλιο του 2025, μια παραδοχή επιπλέον είναι ότι ο φόρος που θα πρέπει να πληρώσει το υπό μελέτη πλοίο είναι υπολογισμένος με την τιμή των δικαιωμάτων ρύπανσης (EUA – European Allowances) τον Οκτώβριο του 2024 (τιμή 60,50 Ευρώ το κάθε δικαίωμα ρύπου) και με τα δεδομένα καταναλώσεων της εταιρίας EUROBULK LTD για το έτος 2023. Επιπλέον, με βάση την ίδια παραδοχή μπορεί να γίνει και μια πρόβλεψη του τι θα συνέβαινε σε επίπεδο φόρου προς την Ευρωπαϊκή ένωση αν το πλοίο είχε τις ίδιες καταναλώσεις τα επόμενα χρόνια (2025 – με συντελεστή 0,7 (70%) και το 2026 – με συντελεστή 1 (100%)). Επιπλέον θεωρούμε συντελεστή 1 (100%) και για τα επόμενα χρόνια μελέτης μέχρι το 2050.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις καταναλώσεις για τις 4 κατηγορίες καταναλώσεων (από/προς Ευρώπη, μεταξύ Ευρωπαϊκών Λιμένων και μέσα σε Ευρωπαϊκό Λιμάνι) για το συγκεκριμένο πλοίο. Οι ίδιες καταναλώσεις ανά κατηγορία επαναλαμβάνονται για όλο τον υπόλοιπο χρόνο (σύνολο περίπου 13-14 φορές)

Πίνακας 8: Πίνακας καταναλώσεων για το EU ETS

| Λιμάνι Αναχώρησης | Λιμάνι Αφίξης | Κατανάλωση Καυσίμου εν πλώ (MT) | Κατανάλωση Καυσίμου εν πλώ ECA (MT) | Κατανάλωση Καυσίμου Λιμάνι (MT) | Συνολική Κατανάλωση Καυσίμου (MT) | Consumption Arrival EU MT | Consumption Departure EU MT | Consumption Between EU MT | Consumption In Port EU MT |
|--|------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Montreal, Canada | Halifax, Canada | 0 | 111,37 | 6,75 | 118,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 216,81 | 167,805 | 7,65 | 392,265 | 384,62 | 0,00 | 0,00 | 7,65 |
| Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 0 | 36,225 | 2,25 | 38,475 | 0,00 | 0,00 | 36,23 | 2,25 |
| Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 0 | 12,6 | 5,4 | 18 | 0,00 | 0,00 | 12,60 | 5,40 |
| Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 193,93 | 167,27 | 5,85 | 367,05 | 0,00 | 361,20 | 0,00 | 0,00 |
| Σύνολο | | | | | | 384,62 | 361,20 | 43,83 | 15,3 |
| Σύνολο (≅13-14 Κυκλικά Ταξίδια) | | | | | | 5384,61 | 4695,6 | 634,725 | 206,55 |

Στη συνέχεια θα υπολογιστούν οι ρύποι CO₂. Οι καταναλώσεις Between EU & In Port EU όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 6 επειδή είναι MGO θα πολλαπλασιαστούν με 3,206 και αυτές που είναι Arrival & Departure EU με συνδυασμό των συντελεστών 3,114 και 3,206 ανάλογα με το αν το πλοίο πλέει σε ECA περιοχή ή όχι. Για το πρώτο κυκλικό ταξίδι του πλοίου προκύπτουν τα ανάλογα αποτελέσματα.

$$CO_2 \text{ Between EU} = 43.83 * 3.206 = 156.548 \text{ MT}$$

$$Total \text{ CO}_2 \text{ Between EU} = 634.725 * 3.206 = 2034.92 \text{ MT}$$

$$CO_2 \text{ in Port} = 15.3 * 3.206 = 49.051 \text{ MT}$$

$$Total \text{ CO}_2 \text{ in Port} = 206.55 * 3.206 = 662.19 \text{ MT}$$

$$CO_2 \text{ Arrival EU} = (216.81 * 3.114) + (167.81 * 3.206) = 675.14 + 537.99 \\ = 1213.13 \text{ MT}$$

$$Total \text{ CO}_2 \text{ Arrival EU} = 14 * 1213.13 = 16983.13 \text{ MT}$$

$$CO_2 \text{ Departure EU} = 361.20 * 3.114 = 1124.77 \text{ MT}$$

$$Total \text{ CO}_2 \text{ Departure EU} = 1124.77 * 13 = 14622.01 \text{ MT}$$

Πίνακας 9: Πίνακας εκπομπών CO₂

| | Arrival EU CO ₂ (TtW) | Departure EU CO ₂ (TtW) | Between EU CO ₂ (TtW) | In Port CO ₂ (TtW) | EU ETS | EU ETS (2024 - 40%) |
|---|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------|---------------------|
| A | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B | 1213,13 | 0,00 | 0,00 | 24,53 | 631,09 | 252,44 |

| | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|----------------|---------------|--------|--------|
| Γ | 0,00 | 0,00 | 116,14 | 7,21 | 123,35 | 49,34 |
| Δ | 0,00 | 0,00 | 40,40 | 17,31 | 57,71 | 23,08 |
| Ε | 0,00 | 1140,17 | 0,00 | 0,00 | 570,08 | 228,03 |
| Σύνολο | 1213,13 | 1140,17 | 156,54 | 49,05 | | |
| Σύνολο (≅13-14 Κυκλικά Ταξίδια) | 16983,13 | 14622,01 | 2034,92 | 622,19 | | |

Πηγή: Εμού του ίδιου

Για να προκύψει η στήλη του EU ETS θα πρέπει στη συνέχεια να πολλαπλασιαστούν οι στήλες Arrival & Departure EU με το 50% και οι στήλες Between & In Port με το 100%. Στο παραπάνω πίνακα έχει γίνει ο υπολογισμός ανά γραμμή για το πρώτο κυκλικό ταξίδι και στη συνέχεια το σύνολο προκύπτει για όλα τα 13-14 κυκλικά ταξίδια

$$EU ETS (A) = 0.00 EUAs$$

$$EU ETS (B) = 1213.13 * 0.5 + 24.53 * 1 = 631.09 EUAs$$

$$EU ETS (Γ) = (116.14 + 7.21) * 1 = 123.35 EUAs$$

$$EU ETS (Δ) = (40.40 + 17.31) * 1 = 57.71 EUAs$$

$$EU ETS (E) = 1140.17 * 0.5 = 570.08 EUAs$$

$$TOTAL EUAs για ένα κυκλικό ταξίδι = 1382,23 EUAs$$

$$Συνολικά EUAs για όλα τα κυκλικά ταξίδια = 18600,11 EUAs$$

Όμως επειδή η πρώτη χρονιά για τον κανονισμό αυτόν λαμβάνει υπόψη το 40% τα τελικά EUAs θα είναι $18600,11 * 0,40 = 7440,04$. Για το 2025 με συντελεστή 70% θα είναι 13020,08 ενώ το 2026 με συντελεστή 100% θα είναι όλο το ποσό.

Με βάση τα παραπάνω και με τιμή για κάθε ένα δικαίωμα Ευρώ 60,95 προκύπτει το κόστος για το EU ETS. Όπως είναι προφανές το κόστος θα αυξάνεται μέχρι το 2026 ακόμα και αν η τιμή για το κάθε δικαίωμα παρέμενε σταθερή καθώς ο συντελεστής υπολογισμού των ρύπων σε κάθε χρονιά αυξάνεται επίσης.

Πίνακας 10: Συγκεντρωτικός Πίνακας για τον κανονισμό EU ETS (2024-2026)

| YEAR | 2024 | 2025 | 2026 |
|------|---------|----------|----------|
| EUAS | 7440.04 | 13020.08 | 18600.11 |

Δεδομένου ότι ο συντελεστής για τα επόμενα χρόνια θα παραμένει ίδιος (1 ή 100%) αν δεν μεταβληθεί κάτι είτε στην πορεία του πλοίου (π.χ. αλλαγή ταξιδιών) ή στις

καταναλώσεις και επομένως και στις εκπομπές του συγκεκριμένου πλοίου και άρα στα δικαιώματα ρύπανσης τότε το ποσό των δικαιωμάτων που θα απαιτούνται από την ναυτιλιακή εταιρία θα παραμείνει ίδιο μέχρι το 2050.

Στη συνέχεια ο κανονισμός / δείκτης που θα υπολογίσουμε είναι ο **FuelEU Maritime**. Ο συγκεκριμένος κανονισμός είναι εφαρμόσιμος από το 2025 και μετά και σε διαφορά με όλους τους υπόλοιπους υπολογίζει όλους τους ρύπους που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από την αρχή της παραγωγής τους μέχρι και την καύση τους (WtT & TtW). Σύμφωνα με τον κανονισμό προκειμένου να υπολογίσουμε το πέναλτι (αν υπάρχει) από την καύση αρχικά του αργού πετρελαίου και στη συνέχεια των εναλλακτικών καυσίμων στο πλαίσιο μια σύγκρισης για το υπό-μελέτη πλοίο, θα πρέπει να συμβουλευτούμε τους κανονισμούς/ντιρεκτίβες EU Directive 2018/2001⁶ και EU Directive 2015/757⁷ ώστε να λάβουμε πληροφορίες αναφορικά με τους συντελεστές υπολογισμού των ρύπων αλλά και τις θερμογόνους δυνάμεις (LCV) του εκάστοτε καυσίμου και παράλληλα να χρησιμοποιήσουμε τις συνολικές καταναλώσεις όπως αυτές υπολογίστηκαν για τα Ευρωπαϊκά ταξίδια (Official Journal of the European Union 2. , 2018) & (Official Journal of the European Union 2. , 2023)

- **LCV (MJ/gr fuel)**
 - Heavy Fuel Oil (ISO 8217 Grades RME through RMK) = 0.0405
 - Light Fuel Oil (ISO 8217 Grades RMA through RMD) = 0.0410
 - Diesel/Gas Oil (ISO 8217 Grades DMX through DMC) = 0.0427
- **CO_{2e} WtT Emission Factor (gr CO_{2e} / MJ)**
 - Heavy Fuel Oil (ISO 8217 Grades RME through RMK) = 13.5
 - Light Fuel Oil (ISO 8217 Grades RMA through RMD) = 13.2
 - Diesel/Gas Oil (ISO 8217 Grades DMX through DMC) = 14.4
- **CO₂ Emission Factor (gr CO₂ / gr fuel)**
 - Heavy Fuel Oil (ISO 8217 Grades RME through RMK) = 3.114
 - Light Fuel Oil (ISO 8217 Grades RMA through RMD) = 3.151
 - Diesel/Gas Oil (ISO 8217 Grades DMX through DMC) = 3.206
- **CH₄OH Emission Factor (gr CH₄ / gr fuel)**
 - Για όλα τα παραπάνω είδη πετρελαίου ισούται με = 0.00005
- **N₂O Emission Factor (gr N₂O / gr fuel)**

⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

⁷ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0757>

- Για όλα τα παραπάνω είδη πετρελαίου ισούται με = 0.00018
- **GWP CO₂**
 - Για όλα τα παραπάνω είδη πετρελαίου ισούται με = 1
- **GWP CH₄**
 - Για όλα τα παραπάνω είδη πετρελαίου ισούται με = 25
- **GWP N₂O**
 - Για όλα τα παραπάνω είδη πετρελαίου ισούται με = 298

Αναφορικά με τις καταναλώσεις στα Ευρωπαϊκά Ταξίδια για όλο το χρόνο προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Πίνακας 11: Πίνακας Καταναλώσεων σε Ευρωπαϊκά Ταξίδια

| Consumption Arrival EU | Consumption Departure EU | Consumption Between EU | Consumption In Port EU |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 5384.61 MT | 4695.60 MT | 634.72 MT | 206.55 MT |

Πηγή: Εμού του ιδίου

Από τις παραπάνω καταναλώσεις (10921,48 MT) οι 7094.85 MT στο σύνολο των κύκλων ταξιδιών είναι MGO καθώς το πλοίο πλέει πολύ σε ECA περιοχές και άρα το VLSFO θα είναι 3826,63 MT:

$$MGO = 13 \times 260 = 7094,85 \text{ MT}$$

$$VLSFO = 10921.48 - 3380 = 3826,63 \text{ MT}$$

Με βάση τα παραπάνω το πρώτο που πρέπει να υπολογίσουμε για τον δείκτη FUEL EU είναι το **WtT** για το VLSFO & MGO αντίστοιχα:

$$WtT_{VLSFO} = \frac{\text{Fuel Consumption VLSFO} * CO2eq \text{ WtT} * LCV \text{ of VLSFO}}{\text{Fuel Consumption VLSFO} * LCV \text{ of VLSFO}} * 10^6 \quad (1)$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

$$3826,63 \text{ MT} * 13,5 \frac{\text{grCO2eq}}{\text{MJ}} * 0,0405 \frac{\text{MJ}}{\text{grVLSFO}} * 1000000$$

$$= 2092209953 \quad (2)$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$3826,63 \text{ MT} * 0.0405 \frac{\text{MJ}}{\text{grVLSFO}} * 1000000 = 154978515 \quad (3)$$

Άρα από την (2) και την (3) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$WtT \text{ for VLSFO} = 13.5 \frac{grCO2eq}{MJ}$$

Αντίστοιχα για το MGO:

$$WtT_{MGO} = \frac{Fuel \text{ Consumption MGO} * CO2eq WtT * LCV \text{ of MGO}}{Fuel \text{ Consumption MGO} * LCV \text{ of MGO}} * 10^6 \quad (1)$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

$$\begin{aligned} 7094,85 \text{ MT} * 14.4 \frac{grCO2eq}{MJ} * 0.0427 \frac{MJ}{grVLSFO} * 1000000 \\ = 4362481368 \quad (2) \end{aligned}$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$7094,85 \text{ MT} * 0.0427 \frac{MJ}{grVLSFO} * 1000000 = 302950095 \quad (3)$$

Άρα από την (2) και την (3) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$WtT \text{ for MGO} = 14.4 \frac{grCO2eq}{MJ}$$

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το **TtW** για το VLSFO & MGO αντίστοιχα:

$$TtW_{VLSFO} = \frac{Fuel \text{ Consumption VLSFO} * CO2eq TtW_{VLSFO}}{\sum Fuel \text{ Consumption (all fuels)} * LCV(per \text{ each fuel})} * 10^6 \quad (1)$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

$$\begin{aligned} CO2eq \text{ TtW}_{VLSFO} \text{ Factor} \\ = GWP_{CO2} * CO2 \text{ Emission Factor} + GWP_{CH4} \\ * CH4 \text{ Emission Factor} + GWP_{N2O} * N2O \text{ Emission Factor} \\ = 1 * 3.114 + 25 * 0.00005 + 298 * 0.00018 \\ = \mathbf{3,1689 \text{ grCO2eq/grVLSFO}} \quad (2) \end{aligned}$$

Άρα:

$$3826.63 \text{ MT} * 3,1689 \text{ grCO2eq/grVLSFO} * 1000000 = 12126169541 \quad (3)$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$3826.63 \text{ MT} * 0.0405 \frac{\text{MJ}}{\text{grVLS}} + 7094.85 \text{ MT} * 0,0427 \frac{\text{MJ}}{\text{grMGO}} = 457928610 \quad (4)$$

Άρα από την (2), την (3) και την (4) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$TtW \text{ for VLSFO} = \frac{3826.63 \text{ MT} * 3.1689 \frac{\text{grCO2eq}}{\text{grVLSFO}}}{457928610 \text{ MT} * \frac{\text{MJ}}{\text{grVLSFO}}} * 1000000 = 26.5 \frac{\text{grCO2eq}}{\text{MJ}}$$

Αντίστοιχα για το MGO

$$TtW_{MGO} = \frac{\text{Fuel Consumption MGO} * CO2eq TtW_{MGO}}{\text{Fuel Consumption (all fuels)} * LCV(\text{per each fuel})} * 10^6 \quad (1)$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

$$\begin{aligned} CO2eq TtW_{MGO} Factor &= GWP_{CO2} * CO2 \text{ Emission Factor} + GWP_{CH} \\ &* CH4 \text{ Emission Factor} + GWP_{N2O} * N2O \text{ Emission Factor} \\ &= 1 * 3.206 + 25 * 0.00005 + 298 * 0.00018 \\ &= \mathbf{3,2809 \text{ grCO2eq/grMGO}} \quad (2) \end{aligned}$$

Άρα:

$$7094.85 \text{ MT} * 3.2809 \frac{\text{grCO2eq}}{\text{grMGO}} * 1000000 = 23135525417 \quad (3)$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$3826.63 \text{ MT} * 0.0405 \frac{\text{MJ}}{\text{grVLS}} + 7094.85 \text{ MT} * 0,0427 \frac{\text{MJ}}{\text{grMGO}} = 457928610 \quad (4)$$

Άρα από την (2), την (3) και την (4) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$TtW \text{ for MGO} = \frac{7094.85 \text{ MT} * 3.2809 \frac{\text{grCO2eq}}{\text{grVLSFO}}}{457928610 \text{ MT} * \frac{\text{MJ}}{\text{grVLSFO}}} * 1000000 = 50.5 \frac{\text{grCO2eq}}{\text{MJ}}$$

Το επόμενο στάδιο είναι να υπολογιστεί το ισοζύγιο συμμόρφωσης (Compliance Balance).

Compliance Balance

$$= (GHG INTENSITY TARGET - ACTUAL GHG INTENSITY) \\ * Total (Consumption * LCV)$$

Όπου, ο στόχος (target) είναι για τα έτη 2025-2029 είναι **89,3368 grCO_{2e}/MJ** σύμφωνα με τον κανονισμό και για την πραγματική απόδοση που επιτυγχάνει το πλοίο αυτό θεωρώντας τις καταναλώσεις ίδιες για το 2025 όπως του 2023 και 2024 ισχύει:

ACTUAL GHG INTENSITY

$$= \frac{TOTAL ((VLSFO Consumption * Co2eqWtT * LCV_{VLSFO}) + (MGO Consumption * Co2eqWtT * LCV_{MGO}))}{TOTAL ((VLSFO Consumption * LCV_{VLSFO}) + (MGO Consumption * LCV_{MGO}))} \\ + \frac{TOTAL((VLSFO Consumption * Co2eqTtW) + (MGO Consumption * Co2eqTtW))}{TOTAL ((VLSFO Consumption * LCV_{VLSFO}) + (MGO Consumption * LCV_{MGO}))} \Rightarrow$$

$$ACTUAL GHG INTENSITY = \frac{6454691321}{457928610} + \frac{35261694957}{457928610} = \frac{41716386278}{457928610} \\ = 91.098 gr CO_2e / MJ$$

Άρα:

Compliance Balance

$$= \left(89,3368 \frac{grCO_2e}{MJ} - 91,098 \frac{grCO_2e}{MJ} \right) \\ * 457928610 gr(VLSFO and MGO) \frac{MJ}{gr(VLSFO + MGO)} \\ = -806,509,632 grCO_2e$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η απόδοση που επιτυγχάνει το πλοίο με βάση τις καταναλώσεις του είναι μεγαλύτερη από το στόχο που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για την περίοδο 2025-2029 και άρα το πλοίο καταλήγει σε πέναλτι το οποίο είναι χρηματικό και θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο της οικονομικής ανάλυσης.

Πίνακας 12: Πίνακας Αποτελεσμάτων για τον κανονισμό του Fuel EU

| | | |
|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| ACTUAL GHG INTENSITY = | 91.098 | gr CO_{2e} / MJ |
| GHG INTENSITY TARGET = | 89.3368 | gr CO_{2e} / MJ |
| COMPLIANCE BALANCE = | -806.509.632 | gr CO_{2e} |

Πηγή: Εμού του ιδίου

4.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΜΕ ΚΑΥΣΗ ΜΕΘΑΝΟΛΗΣ

Έχοντας, ολοκληρώσει την ανάλυση αναφορικά με το VLSFO και το MGO, το επόμενο βήμα προκειμένου να γίνει η σύγκριση και αξιολόγηση της μεθανόλης είναι να υπολογιστούν οι δείκτες/κανονισμοί αν το πλοίο καταναλώνει Μεθανόλη (συμβατική) και Πράσινη μεθανόλη αντίστοιχα. Για να πραγματοποιηθεί αυτό απαιτείται να υπολογιστούν οι καταναλώσεις του συγκεκριμένου πλοίου ξανά σε «αναλογία» μεθανόλης.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι από τα χαρακτηριστικά του VLSFO & MGO ότι η θερμογόνος δύναμη είναι από 41-42,7 MJ/kg, ενώ για τη μεθανόλη είναι 19,9 MJ/kg (B&W M. , 2024). Αυτό σημαίνει ότι 1 κιλό VLSFO και 1 κιλό MGO αντιστοιχεί σε 2,03 kg & 2,14 kg μεθανόλης αντίστοιχα. Με άλλα λόγια :

Πίνακας 10: Πίνακας αναλογίας Μεθανόλης σε σχέση με VLSFO & MGO

| Καύσιμο | LCV (MJ/kg) |
|-------------------|-------------|
| VLSFO | 40.5 |
| MGO | 42.7 |
| CH ₄ O | 19.9 |

Πηγή: Εμού του ίδιου

$$\frac{LCV_{vlsfo}}{LCV_{CH_4}} = \frac{40.5}{19.9} \approx 2.03$$

Και αντίστοιχα για το MGO:

$$\frac{LCV_{mgo}}{LCV_{CH_4}} = \frac{42.7}{19.9} \approx 2.14$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αυτό που μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για το VLSFO απαιτείται 2,03 φορές περισσότερη μεθανόλη για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας που θα μας έδινε 1 κιλό VLSFO, ενώ για το MGO χρειάζεται 2,14 φορές περισσότερη μεθανόλη για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας που θα μας έδινε 1 κιλό MGO.

Παράλληλα, τόσο στην περίπτωση της μεθανόλης όσο και σε άλλα εναλλακτικά καύσιμα, όπως είναι η αμμωνία υπάρχει και χρήση πιλοτικού καυσίμου που θα θεωρήσουμε στους υπολογισμούς μας της τάξεως του 5%.

Για τις καταναλώσεις της μεθανόλης ισχύουν τα ακόλουθα λαμβάνοντας υπόψη τις καταναλώσεις για το VLSFO & MGO αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} \text{Κατανάλωση ECA + Port Stay MEΘΑΝΟΛΗΣ σε αναλογία MGO} &\rightarrow \\ &= 7135 * 2,14 = 15,269.49 \text{ MT}(\text{CH}_4\text{O}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Κατανάλωση Εν Πλω MEΘΑΝΟΛΗΣ σε αναλογία VLSFO} &\rightarrow \\ &= 5556 * 11,279.55 \text{ MT}(\text{CH}_4\text{O}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Συνολική Κατανάλωση MEΘΑΝΟΛΗΣ σε αναλογία MGO \& VLSFO} &\rightarrow \\ &= \mathbf{26,549,04 \text{ MT} (\text{CH}_4\text{O})} \end{aligned}$$

Για τον δείκτη του CII υπολογίσαμε τις συνολικές καταναλώσεις όλων των ταξιδιών που πραγματοποίησε το υπό μελέτη πλοίο (υπολογισμοί ακριβώς από πάνω) και στη συνέχεια με βάση τα όρια και τους συντελεστές για τον υπολογισμό του CII υπολογίσαμε για τη συγκεκριμένη κατανάλωση το δείκτη.

Για τη μεθανόλη και των υπολογισμό των ρύπων CO₂ που προκύπτουν από αυτή θα χρησιμοποιηθεί ως συντελεστής για τον υπολογισμό των CO₂ το Cf = 1,375 όπως αναφέρεται και στην οδηγία 10585/21 (06/07/2021). Παράλληλα, αν θεωρήσουμε ότι για την καύση της μεθανόλης απαιτείται και μια προσθήκη πιλοτικού καυσίμου MGO (5%), τότε απαιτούνται για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του πλοίου 26,549,04 MT Μεθανόλης και 1,327.45 MT MGO. Άρα:

$$\text{Emissions CO}_2 \text{ from Methanol} = 26,549.04 * 1.375 = 36,504.93 \text{ MT}$$

$$\text{Emissions from Pilot Fuel} = 1,327.45 * 3.206 = 4,255.80 \text{ MT}$$

Με βάση τα παραπάνω το CII που προκύπτει με βάση τα δεδομένα του υπό-μελέτης πλοίου θα είναι:

$$\begin{aligned} \text{CII} &= \frac{\text{Total CO}_2 \text{ Emissions}}{\text{DWT} * \text{Distance}} = \frac{36,504.93 + 4,255.81}{42,166 * 101,456} = \frac{40,760.74}{4,277,993,696} * 10^6 \\ &= \frac{40,760,740,000}{4,277,993,696} = \mathbf{9.528 \frac{\text{grCO}_2}{\text{dwt} * \text{nm}}} \end{aligned}$$

Το CII που προκύπτει είναι μεγαλύτερο από την περίπτωση όπου το πλοίο καίει VLSFO και MGO. Αυτό δε θα πρέπει να μας παραξενεύει δεδομένου ότι ο κανονισμός του CII δεν έχει ως σκοπό την ανθρακοποίηση της ναυτιλίας με κατεύθυνση τα εναλλακτικά καύσιμα, αλλά τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του πλοίου (energy efficiency) λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε πλοίου, τις ταχύτητες και τη λειτουργία του σε όλη τη διάρκεια του χρόνου (π.χ. πλεύσιμες μέρες, αναμονές σε λιμάνια, δρομολόγια, θαλάσσιοι δρόμοι, κλπ). Αυτό σημαίνει ότι το είδος του καυσίμου δεν λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου δείκτη. Μάλιστα, σε ένα αποτέλεσμα ενός όχι αποδεκτού CII (μεγαλύτερου από C) το μέτρο για την βελτίωση του δείκτη, είναι συνήθως η μείωση της ταχύτητας του πλοίου με σκοπό τη επίτευξη χαμηλότερων καταναλώσεων και όχι η αλλαγή καυσίμου.

Όπως και στην περίπτωση του VLSFO & MGO και με δεδομένο την αύξηση του συντελεστή που καθορίζει το επιτρεπτό και το επιθυμητό επίπεδο για το εκάστοτε πλοίο, αν θεωρήσουμε ότι το πλοίο έχει τις ίδιες καταναλώσεις και το 2024, 2025, 2026 και μέχρι το τελευταίο έτος μελέτης (2050) τα αποτελέσματα αναφορικά με τη βαθμονόμηση του CII θα είναι:

Εικόνα 18: Βαθμολογία πλοίου αναφορικά με το δείκτη με χρήση της μεθανόλης

| | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030-2050 |
|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| ATTAINED CII | 9,528 | 9,528 | 9,528 | 9,528 | 9,528 | 9,528 | 9,528 |
| REQUIRED CII | 10,102 | 9,885 | 9,668 | 9,449 | 9,332 | 9,015 | 8,798 |

| exp(d1) | exp(d2) | exp(d3) | exp(d4) |
|---------|---------|---------|---------|
| 0,83 | 0,94 | 1,08 | 1,19 |

$$\left. \begin{aligned} \text{superior boundary} &= \exp(d_1) \cdot \text{required CII} \\ \text{lower boundary} &= \exp(d_2) \cdot \text{required CII} \\ \text{upper boundary} &= \exp(d_3) \cdot \text{required CII} \\ \text{inferior boundary} &= \exp(d_4) \cdot \text{required CII} \end{aligned} \right\}$$

| | | | | | | | |
|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|----------|
| Superior | 8,38466 | 8,20455 | 8,02444 | 7,84267 | 7,74556 | 7,48245 | 7,30234 |
| Lower | 9,49588 | 9,2919 | 9,08792 | 8,88206 | 8,77208 | 8,4741 | 8,27012 |
| Upper | 10,91016 | 10,6758 | 10,4414 | 10,20492 | 10,07856 | 9,7362 | 9,50184 |
| Inferior | 12,02138 | 11,76315 | 11,5049 | 10,20492 | 11,10508 | 10,7279 | 10,46962 |
| | C | C | C | C | C | C | D ή E |

Πηγή: Εμού του ιδίου

Σημειώνεται επίσης ότι το επιθυμητό όριο του δείκτη δεν αλλάζει μιας και η αλλαγή καυσίμου δεν το επηρεάζει.

Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός για το EU ETS για το συγκεκριμένο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αν λάβουμε υπόψη μας ότι το πλοίο καταναλώνει τώρα μεθανόλη σε συνδυασμό με το πιλοτικό καύσιμο (ντίζελ). Για την περίοδο της μελέτης της παρούσας εργασίας θα υπολογισθούν μόνο οι ρύποι που αφορούν στο CO₂ από τη χρήση της μεθανόλης σε συνδυασμό με τη χρήση του προπομπού καυσίμου (Ντίζελ). Ο κανονισμός EU ETS θα αναθεωρηθεί το 2026 για τα επόμενα έτη καταγραφής, περιλαμβάνοντας και επιπλέον ρύπους όπως το CH₄ (μεθάνιο) και το N₂O (νιτρικά οξείδια).

Το συγκεκριμένο πλοίο όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση των περιβαλλοντικών δεικτών με τη χρήση πετρελαίου, σε ένα κυκλικό ταξίδι περνάει από τρία Ευρωπαϊκά Λιμάνια (Ρότερνταμ, Αμβέρσα και Βρέμη). Άρα αν γίνει ο υπολογισμός για το πρώτο κυκλικό ταξίδι τότε η ίδια διαδικασία (υπολογισμός) ακολουθείται και για όλη τη χρονιά αφού πρόκειται για πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που ακολουθεί τον ίδιο κύκλο ταξιδιού όλο το χρόνο.

Η διαμόρφωση και ο υπολογισμός του δείκτη σήμερα και για επόμενα έτη θα λάβει υπόψη του τη Μεθανόλη που θα καταναλώσει το πλοίο καθώς το Pilot fuel. Όπως φαίνεται ακολούθως αρχικά υπολογίζεται η κατανάλωση για μεθανόλη και πιλοτικό καύσιμο για το πρώτο κυκλικό ταξίδι και στη συνέχεια το σύνολο για τα περίπου 13-14 ταξίδια που υποθέσαμε και στη περίπτωση του πετρελαίου ως καύσιμο. Έτσι προκύπτει:

Πίνακας 13: Πίνακας αρχικών καταναλώσεων για το πρώτο κυκλικό ταξίδι

| Ταξίδι | Λιμάνι Αναχώρησης | Λιμάνι Αφίξης | Κατανάλωση Καυσίμου εν πλώ (MT) | Κατανάλωση Καυσίμου εν πλώ ECA (MT) | Κατανάλωση Καυσίμου Λιμάνι (MT) |
|--------|------------------------|------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Montreal, Canada | Halifax, Canada | 0 | 111,37 | 6,75 |
| | Halifax, Canada | Bremenhaven, Germany | 216,81 | 167,805 | 7,65 |
| | Bremenhaven, Germany | Antwerp, Belgium | 0 | 36,225 | 2,25 |
| | Antwerp, Belgium | Rotterdam, Netherlands | 0 | 12,6 | 5,4 |
| | Rotterdam, Netherlands | Montreal, Canada | 193,93 | 167,27 | 5,85 |

Πηγή: Εμού του ίδιου

Για τον υπολογισμό των καταναλώσεων της μεθανόλης ανά Ευρωπαϊκό ταξίδι, χρησιμοποιήθηκε η αναλογία θερμογόνου δύναμης ανάλογα με το αν το πλοίο κατανάλωνε VLSFO ή MGO και όπως και πριν στη συνέχεια τις χωρίσαμε τις καταναλώσεις αυτές στις τέσσερις κατηγορίες από/προς Ευρωπαϊκά Λιμάνια (Arrival/Departure EU), μεταξύ Ευρωπαϊκών Λιμένων (Between EU) και εντός Ευρωπαϊκών Λιμένων (In Port EU). Παράδειγμα υπολογισμού καταναλώσεων για τη δεύτερη γραμμή που αποτυπώνει ένα ταξίδι προς Ευρωπαϊκό Λιμάνι (Halifax – Bremerhaven):

$$\text{Consumption Methanol} = 216.81 * 2.03 + 167.805 * 2.14 = 440.12 + 359.09 = 799.23 \text{ MT (αναφορά με κόκκινο περίγραμμα)}$$

Πίνακας 14: Πίνακας καταναλώσεων Μεθανόλης και Πιλοτικού καυσίμου

| Κατανάλωση Arrival EU METHANOL (MT) | Κατανάλωση Arrival EU Pilot Fuel (MT) | Κατανάλωση Deprature EU METHANOL (MT) | Κατανάλωση Deprature EU Pilot Fuel (MT) | Κατανάλωση Between EU METHANOL (MT) | Κατανάλωση Between EU Pilot Fuel (MT) | Κατανάλωση In Port EU METHANOL (MT) | Κατανάλωση In Port EU Pilot Fuel (MT) | Συνολική Κατανάλωση METHANOL (MT) | Συνολική Κατανάλωση Pilot Fuel (MT) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 799,23 | 39,96 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 16,37 | 0,82 | 815,60 | 40,78 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 77,52 | 3,88 | 4,82 | 0,24 | 82,34 | 4,12 |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 25,58 | 1,28 | 11,56 | 0,58 | 37,13 | 1,86 |
| 0,00 | 0,00 | 751,64 | 37,58 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 751,64 | 37,58 |

Στο νόμμερο αυτό για τον υπολογισμό του πιλοτικού καυσίμου θα πραγματοποιήσουμε την ακόλουθη πράξη:

$$\text{MGO Consumption as pilot fuel} = 799.23 * 0.05 = 39.96 \text{ MT}$$

(μπε αναφορά παραπάνω)

Με τον ίδιο τρόπο γίνεται ο υπολογισμός για την κατανάλωση μεθανόλης με τους αντίστοιχους συντελεστές (θερμογόνου δύναμης) και στη συνέχεια η κατηγοριοίηση της ανάλογα με το τι ταξίδι είναι για όλα τα ταξίδια. Το σύνολο της κάθε γραμμής του παραπάνω πίνακα αποτυπώνεται στις στήλες Συνολική Κατανάλωση Methanol & Pilot Fuel αντίστοιχα. Άρα για το πρώτο κυκλικό ταξίδι θα ισχύει ότι απαιτείται για τα ευρωπαϊκά ταξίδια:

$$\text{Συνολική Κατανάλωση Μεθανόλης} = 815,60 + 82,34 + 37,1 + 751,64 = 1686,68 \text{ MT}$$

Συνολική Κατανάλωση του Πιλοτικού Καυσίμου

$$= 40,78 + 4,12 + 1,86 + 37,58 = 84,34 \text{ MT}$$

Άρα για τα 13-14 κυκλικά ταξίδια που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί ο ένας χρόνος θα ισχύει ότι:

$$\text{Συνολική Κατανάλωση Μεθανόλης} = 22742,75 \text{ MT}$$

$$\text{Συνολική Κατανάλωση του Πιλοτικού Καυσίμου} = 1137,14 \text{ MT}$$

Για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ θα πολλαπλασιάσουμε την κατανάλωση ανά περίπτωση καυσίμου (MGO & Methanol) με τους αντίστοιχους συντελεστές CO₂, δηλαδή Cf = 3.206 & Cf = 1.375 αντίστοιχα.

Με αυτό το τρόπο προκύπτει ο παρακάτω πίνακας όπου στις δύο τελευταίες στήλες αποτυπώνονται τα σύνολα των εκπομπών από την καύση της μεθανόλης και του πιλοτικού καυσίμου αντίστοιχα για το πρώτο κυκλικό ταξίδι.

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας εκπομπών CO₂ για το πρώτο κυκλικό ταξίδι

| | Arrival EU CO ₂ (TtW) METHANOL | Arrival EU CO ₂ (TtW) Pilot Fuel | Departure EU CO ₂ (TtW) METHANOL | Departure EU CO ₂ (TtW) Pilot Fuel | Between EU CO ₂ (TtW) METHANOL | Between EU CO ₂ (TtW) Pilot Fuel | In Port CO ₂ (TtW) METHANOL | In Port CO ₂ (TtW) Pilot Fuel | Total EU CO ₂ (TtW) METHANOL | Total EU CO ₂ (TtW) Pilot Fuel |
|---|---|---|---|---|---|---|--|--|---|---|
| A | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| B | 1098,94 | 128,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 22,51 | 2,62 | 1121,45 | 130,74 |
| Γ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 106,59 | 12,43 | 6,62 | 0,77 | 113,21 | 13,20 |
| Δ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 35,17 | 4,10 | 15,89 | 1,85 | 51,06 | 5,95 |
| E | 0,00 | 0,00 | 1033,50 | 120,49 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1033,50 | 120,49 |

Πηγή: Εμού του ίδιου

Συνολικές εκπομπές CO₂ Μεθανόλης

$$= 1121,45 + 113,21 + 51,06 + 1033,50 = 2319,22 \text{ MT}$$

Συνολικές εκπομπές CO₂ Πιλοτικού Καυσίμου

$$= 130,74 + 13,20 + 5,95 + 120,49 = 270,38 \text{ MT}$$

Άρα για τα 13-14 κυκλικά ταξίδια που απαιτούνται για να ολοκληρωθεί ο ένας χρόνος θα ισχύει ότι:

$$\text{Συνολική Κατανάλωση Μεθανόλης} = 31271,28 \text{ MT}$$

Συνολική Κατανάλωση του Πιλοτικού Καυσίμου = 3645,66 MT

Για να προκύψει η στήλη του EU ETS (που φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα – πίνακας 17) θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι στήλες CO2 Arrival & Departure EU με το 50% και οι στήλες CO2 Between & In Port με το 100%. Στο παραπάνω πίνακα έχει γίνει ο υπολογισμός ανά γραμμή για το πρώτο κυκλικό ταξίδι και στη συνέχεια το σύνολο προκύπτει για όλα τα 13-14 κυκλικά ταξίδια

$$EU ETS (A) = 0.00 EUAs$$

$$EU ETS (B) = (1098,94 + 128,12) * 0.5 + (22,51 + 2,62) * 1 = 613,53 + 25,13 \\ = 638,66 EUAs$$

$$EU ETS (Γ) = (106,59 + 12,43 + 6,62 + 0,77) * 1 = 126,41 EUAs$$

$$EU ETS (Δ) = (35,17 + 4,10 + 15,89 + 1,85) * 1 = 57,01 EUAs$$

$$EU ETS (E) = (1033,50 + 120,49) * 0.5 = 576,99 EUAs$$

$$TOTAL EUAs για ένα κυκλικό ταξίδι = 1399,07 EUAs$$

$$Συνολικά EUAs για όλα τα κυκλικά ταξίδια = 18826,66 EUAs$$

Όμως επειδή η πρώτη χρονιά για τον κανονισμό αυτόν λαμβάνει υπόψη το 40% τα τελικά EUAs θα είναι $18826,66 * 0,40 = 7530,66$ EUAs. Για το 2025 με συντελεστή 70% θα είναι 13178,20 EUAs ενώ το 2026 με συντελεστή 100% θα είναι όλο το ποσό.

Πίνακας 16: Πίνακας EU ETS 2024, 2025, 2026 με χρήση Μεθανόλης

| YEAR | 2024 | 2025 | 2026 |
|------|---------|----------|----------|
| EUAS | 7530.66 | 13178.20 | 18826.66 |

Πηγή: Εμού του ιδίου

Σύμφωνα με τον παραπάνω υπολογισμό που αφορά σε Ευρωπαϊκά ταξίδια και σύμφωνα με την αναλογία συμβατικών καυσίμων με μεθανόλη, για τον κανονισμό FuelEU, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση που υπάρχει στις καταναλώσεις από και προς την ΕΕ καθώς και εσωτερικά της ΕΕ, προκύπτουν οι παρακάτω ποσότητες:

$$CH_4O αναλογίας MGO = 7094,85 * 2,14 = 15182,97 MT$$

$$CH_4O αναλογίας VLSFO = 3826,63 * 2,03 = 7768,06 MT$$

Άρα συνολικά χρειάζονται 22,951.03 MT CH₄O απαιτούνται και 1147.55 MT MGO ως Pilot fuel.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτές τις τιμές για τους τόνους μεθανόλης καθώς και την οδηγία MEPC77/7/XX (Ημερομηνία: 02/08/2021)⁸ στην υποσημείωση 8 μπορούμε να υπολογίσουμε την «ένταση» των GHG εκπομπών με τη χρήση της πράσινης μεθανόλης (e-methanol) για το συγκεκριμένο πλοίο. Τα στάδια για τον υπολογισμό αυτό είναι τα ακόλουθα:

Όπως και στην περίπτωση του πετρελαίου το πρώτο που πρέπει να υπολογίσουμε για τον δείκτη FUEL EU είναι το **WtT** για την e-methanol & το πιλοτικό καύσιμο MGO αντίστοιχα:

$$WtT_{e-methano} = \frac{Fuel\ Consumption\ e - methanol * CO2eq\ WtT * LCV\ of\ e - methanol}{Fuel\ Consumption\ e - methanol * LCV\ of\ e - methanol} * 10^6 \quad (1)$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

$$22951,03\ MT * (-67,1) \frac{grCO2eq}{MJ} * 0,0199 \frac{MJ}{grVLSFO} * 1000000 = -30646280849 \quad (2)$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$22951,03\ MT * 0,0199 \frac{MJ}{grVLSFO} * 1000000 = 456725497 \quad (3)$$

Άρα από την (2) και την (3) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$WtT\ for\ VLSFO = -67,1 \frac{grCO2eq}{MJ}$$

Αντίστοιχα για το MGO:

$$WtT_{MGO} = \frac{Fuel\ Consumption\ MGO * CO2eq\ WtT * LCV\ of\ MGO}{Fuel\ Consumption\ MGO * LCV\ of\ MGO} * 10^6 \quad (1)$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

⁸ <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10585-2021-INIT/en/pdf>

$$1147,55 \text{ MT} * 14.4 \frac{\text{grCO}_2\text{eq}}{\text{MJ}} * 0.0427 \frac{\text{MJ}}{\text{grVLSFO}} * 1000000 = 705605544 \text{ (2)}$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$1147,55 \text{ MT} * 0.0427 \frac{\text{MJ}}{\text{grVLS}} * 1000000 = 49000385 \text{ (3)}$$

Άρα από την (2) και την (3) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$\mathbf{WtT \text{ for MGO} = 14.4 \frac{\text{grCO}_2\text{eq}}{\text{MJ}}}$$

Στη συνέχεια όπως και πριν για το πετρέλαιο έτσι και εδώ θα υπολογιστεί το **TtW** για την e-methanol & το MGO αντίστοιχα:

$$TtW_{e\text{-methanol}} = \frac{\text{Fuel Consumption } e\text{-methanol} * CO_2\text{eq } TtW_{e\text{-methanol}}}{\sum \text{Fuel Consumption (all fuels)} * LCV(\text{per each fuel})} * 10^6 \text{ (1)}$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

$$\begin{aligned} CO_2\text{eq } TtW_{VLSFO} \text{Factor} &= GWP_{CO_2} * CO_2 \text{ Emission Factor} + GWP_{CH_4} \\ &* CH_4 \text{ Emission Factor} + GWP_{N_2O} * N_2O \text{ Emission Factor} \\ &= 1 * 1,375 + 25 * 0.00005 + 298 * 0.00018 \\ &= \mathbf{1,4299 \text{ grCO}_2\text{eq/grVLSFO} \text{ (2)}} \end{aligned}$$

Άρα:

$$22951,03 \text{ MT} * 1,4299 \frac{\text{grCO}_2\text{eq}}{\text{gr } e\text{-methanol}} * 1000000 = 32817448287 \text{ (3)}$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$22951,03 \text{ MT} * 0,0199 \frac{\text{MJ}}{\text{grVLS}} + 1147,55 \text{ MT} * 0,0427 \frac{\text{MJ}}{\text{grMG}} = 505725882 \text{ (4)}$$

Άρα από την (2), την (3) και την (4) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$TtW \text{ for VLSFO} = \frac{22951,03 \text{ MT} * 1,4299 \frac{\text{grCO}_2\text{eq}}{\text{grVLSFO}}}{505725882 \text{ MT} * \frac{\text{MJ}}{\text{grVLSFO}}} * 1000000 = 64,9 \frac{\text{grCO}_2\text{eq}}{\text{MJ}}$$

Αντίστοιχα για το MGO ως πλοϊτικό καύσιμο θα ισχύουν:

$$TtW_{MGO} = \frac{Fuel\ Consumption\ MGO * CO2eq\ TtW_{MGO}}{Fuel\ Consumption\ (all\ fuels) * LCV(per\ each\ fuel)} * 10^6 \quad (1)$$

Για τον αριθμητή ισχύει:

$$\begin{aligned} CO2eq\ TtW_{MGO}Factor &= GWP_{CO_2} * CO2\ Emission\ Factor + GWP_{CH_4} \\ &* CH4\ Emission\ Factor + GWP_{N_2O} * N2O\ Emission\ Factor \\ &= 1 * 3.206 + 25 * 0.00005 + 298 * 0.00018 \\ &= \mathbf{3,2809\ grCO2eq/grMGO} \quad (2) \end{aligned}$$

Άρα:

$$1147,55\ MT * 3.2809 \frac{grCO2eq}{grMGO} * 1000000 = 3742034320 \quad (3)$$

Για τον παρονομαστή ισχύει:

$$22951,03\ MT * 0,0199 \frac{MJ}{grVLS} + 1147,55\ MT * 0,0427 \frac{MJ}{grMGO} = 505725882 \quad (4)$$

Άρα από την (2), την (3) και την (4) στην (1) θα ισχύει μετά την απλοποίηση των μονάδων μέτρησης ότι

$$TtW\ for\ MGO = \frac{1147,55\ MT * 3.2809 \frac{grCO2eq}{grVLSFO}}{505725882\ MT * \frac{MJ}{grVLSFO}} * 1000000 = 7,4 \frac{grCO2eq}{MJ}$$

Το επόμενο στάδιο είναι να υπολογιστεί το ισοζύγιο συμμόρφωσης (Compliance Balance).

$$\begin{aligned} Compliance\ Balance &= (GHG\ INTENSITY\ TARGET - ACTUAL\ GHG\ INTENSITY) \\ &* Total\ (Consumption * LCV) \end{aligned}$$

Όπου, ο στόχος (target) είναι για τα έτη 2025-2029 είναι **89,3368 grCO2e/MJ** σύμφωνα με τον κανονισμό και για την πραγματική απόδοση που επιτυγχάνει το πλοίο αυτό θεωρώντας τις καταναλώσεις ίδιες για το 2025 όπως του 2023 και 2024 ισχύει:

ACTUAL GHG INTENSITY

$$= \frac{TOTAL((e - methanol Consumption * Co2eqWtT * LCV_{e-methanol}) + (MGO Consumption * Co2eqWtT * LCV_{MGO}))}{TOTAL((e - methanol Consumption * LCV_{e-methanol}) + (MGO Consumption * LCV_{MGO}))}$$

$$+ \frac{TOTAL((e - methanol Consumption * Co2eqTtW) + (MGO Consumption * Co2eqTtW))}{TOTAL((e - methanol Consumption * LCV_{VLSFO}) + (MGO Consumption * LCV_{MGO}))} \Rightarrow$$

$$ACTUAL GHG INTENSITY = \frac{-29940675305}{505725882} + \frac{36559482606}{505725882} = \frac{6618807301}{505725882}$$

$$= 13,087 \text{ gr CO}_2\text{e} / \text{MJ}$$

Άρα:

Compliance Balance

$$= \left(89,3368 \frac{\text{grCO}_2\text{e}}{\text{MJ}} - 13,087 \frac{\text{grCO}_2\text{e}}{\text{MJ}} \right)$$

$$* 505725882 \text{ gr(VLSFO and MGO)} \frac{\text{MJ}}{\text{gr(VLSFO + MGO)}}$$

$$= 38.561.124.674 \text{ grCO}_2\text{e}$$

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα, όπως φαίνεται στον πίνακα 17.

Πίνακας 17: Πίνακας Αποτελεσμάτων για τον κανονισμό του Fuel EU με χρήση e-methanol

| | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| ACTUAL GHG INTENSITY = | 13.0877 | gr CO₂e / MJ |
| GHG INTENSITY TARGET = | 89.3368 | gr CO₂e / MJ |
| COMPLIANCE BALANCE = | 38,561,124,674 | gr CO₂e |

Πηγή: Εμού του ίδιου

Συμφώνα με το παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι το Ισοζύγιο έντασης πραγματικών εκπομπών (Actual GHG Intensity) σε σχέση με το στόχο εκπομπών (GHG Intensity Target) είναι θετικό και επομένως το πλοίο με την κατανάλωση αυτού του καυσίμου δεν υπόκειται σε κάποιο χρηματικό πέναλτι.

4.3.4 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.3.4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (MGO/VLSFO, EUAs & CH4OH/Pilot Fuel) ΚΑΤΑ ΤΟ ΕΤΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ (2024)

Έχοντας υπολογίσει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο τόσο από τη χρήση του VLSFO & MGO, αλλά και από τη χρήση της μεθανόλης ως καύσιμα για το υπό μελέτη πλοίο, το

επόμενο στάδιο είναι να υπολογιστεί το οικονομικό σκέλος σε βάθος 25ετίας, μέχρι το 2050, τόσο από την αγορά και χρήση αυτών των καυσίμων αλλά και το οικονομικό πέναλτι όπου υπάρχει. Με αυτό το τρόπο θα εντοπίσουμε το σημείο εκείνο (χρονικά και κοστολογικά) όπου ένα εναλλακτικό (πράσινο) καύσιμο όπως είναι η πράσινη μεθανόλη θα αποτελεί μια πιθανή επιλογή για έναν πλοιοκτήτη.

Αναλυτικότερα, στις 18/10/2024, η τιμή του VLSFO διαμορφώνεται στα \$ 602,50 / MT, ενώ για το MGO στα \$ 742,00 / MT. (Ship and Bunker, 2024). Η τιμή αυτή αναφέρεται σε ένα μέσο όρο τιμής 20 σημαντικότερων λιμένων ανεφοδιασμού.

Στην ανάλυση του πετρελαίου, ως καύσιμο, για το υπό μελέτη πλοίο είχαμε υπολογίσει ότι το πλοίο απαιτεί για ένα χρόνο:

$$\text{Κατανάλωση ECA + Port Stay (MGO)} = 7135,28 \text{ MT}$$

Και αντίστοιχα:

$$\text{Κατανάλωση VLSFO} = 5556,43 \text{ MT}$$

Άρα, με βάση τις παραπάνω καταναλώσεις θα ορίσουμε ένα «νέο» πετρέλαιο που θα έχει την ακόλουθη αναλογία MGO & VLSFO:

$$\text{MGO \%} = \frac{7135,28}{12691} * 100 \approx 57\%$$

$$\text{VLSFO \%} = \frac{5556,43}{12691} * 100 \approx 43 \%$$

Σύμφωνα με την αναλογία αυτή, προκύπτουν για σήμερα (2024) τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned} \text{A) Συντελεστής CO}_2 \text{ αναλογία (VLSFO \& MGO)} &= 0.57 * 3.206 + 0.43 * 3.114 = \\ &1.827 + 1.339 = \mathbf{3.166 \text{ gCO}_2/\text{gfuel}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{B) Κόστος Καυσίμου αναλογία (VLSFO \& MGO)} &= 0.57 * 742 + 0.43 * 602,50 = \\ &422,94 + 259.07 = \mathbf{\$ 682.01 / MT \text{ αναλογίας (MGO \& VLSFO)}} \end{aligned}$$

Επιπρόσθετα, για την μεθανόλη ορίσαμε ότι η τιμή της πράσινης μεθανόλης σήμερα υπολογίζεται κατά μέσο όρο στα \$ 1220 / MT, ενώ αναφορικά με τον συντελεστή εκπομπών CO₂ και το κόστος αναλογίας μεθανόλης και πιλοτικού καυσίμου θα ισχύουν:

A) Για τον συντελεστή του CO₂ εκπομπών λαμβάνοντας υπόψη τη μεθανόλη και το πιλοτικό καύσιμο θα ισχύει:

$$\begin{aligned} \text{Συντελεστής } CO_2 \text{ αναλογίας (CH}_4\text{O \& MGO)} &= 1 * 1.375 + 0.05 * 3.206 \\ &= 1.375 + 0.160 = \mathbf{1.5353 \text{ gCO}_2/\text{gfuel}} \end{aligned}$$

Β) Ενώ για το κόστος του καυσίμου μεθανόλης και MGO ως πιλοτικό καύσιμο θα ισχύει:

$$\begin{aligned} \text{Κόστος Καυσίμου αναλογία (μεθανόλης \& MGO)} &= 1 * 1220 + 0.05 * 742 = 1220 + \\ &37.1 = \mathbf{\$ 1257.1 / MT} \end{aligned}$$

Επιπλέον, όσον αφορά την τιμή των δικαιωμάτων ρύπανσης (EUAs) για τον κανονισμό του EU ETS, η τιμή σήμερα (18/10/2024) διαμορφώνεται στα 60,50 Ευρώ/EUA.

Τέλος, η ισοτιμία Ευρώ – Δολαρίου για τους ακόλουθους υπολογισμούς είναι: 1 Ευρώ να ισούται με 1,09 δολάρια⁹.

4.3.4.2 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΚΟΣΤΟΥ (MGO/VLSFO, EUAs & CH4O/Pilot Fuel) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2025-2050

Με σκοπό την οικονομική ανάλυση θα ληφθούν τρία διαφορετικά σενάρια αναφορικά με την μεταβολή των τιμών τόσο αγοράς και χρήσης του εκάστοτε καυσίμου όσο και των δικαιωμάτων ρύπανσης (EUAs). Στην ανάλυση και τον καθορισμό των σεναρίων αυτών δεν θα ληφθούν υπόψη γεωπολιτικές εξελίξεις, πιθανές οικονομικές κρίσεις, η κλιματική αλλαγή, πιθανά ακραία φυσικά φαινόμενα, οποιοδήποτε πολιτικό παρασκήνιο που θα επηρέαζε τις τιμές των καυσίμων και γενικότερα παράγοντες που δεν μπορούν να προβλεφθούν.

4.3.4.2.1 Πετρέλαιο (Αναλογία VLSFO & MGO)

Σενάριο 1:

Αρχικά όσον αφορά το πετρέλαιο, λαμβάνοντας ότι η τιμή του πετρελαίου κατά το έτος 2000 ήταν κατά μέσο όρο \$ 250 / MT (Bunker Index, 2024) αυτό σημαίνει ότι για να έχει φτάσει η τιμή του σήμερα \$ 682.01 MT ισχύει:

$$\text{Παρελθοντική τιμή} * (1 + \% \text{ πληθωρισμού})^{\text{χρόνια μελέτης}} = \text{Τιμή Σήμερα} \Rightarrow$$

$$250 * (1 + y)^{24} = 682.01 \Rightarrow$$

$$(1 + y)^{24} = \frac{682.01}{250} \Rightarrow$$

⁹ Πηγή:

https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.el.html

$$(1 + y) = 2.73^{\frac{1}{24}} \Rightarrow y = 2.73^{\frac{1}{24}} - 1 \Rightarrow \text{Γνωρίζουμε ότι } 2.73^{\frac{1}{24}} = \sqrt[24]{2.73} \approx \ln(2.73) \\ = 1.004 \text{ περίπου}$$

$$\text{Άρα } y = 1.0427 - 1 = 0.0427 \text{ ή } 4.27\%$$

Χρησιμοποιώντας την ίδια εξίσωση με παραπάνω και το ποσοστό αυτό πληθωρισμού που βρήκαμε θα υπολογίσουμε ποια θα είναι η τιμή του πετρελαίου σε 25 χρόνια (2050) από τώρα αν θεωρήσουμε ότι το ποσοστό αυτό πληθωρισμού παραμένει σταθερό. Η παρελθοντική τιμή αυτή τη φορά είναι η σημερινή τιμή, δηλαδή το \$ 683,72.

$$\text{Παρελθοντική τιμή} * (1 + \% \text{ πληθωρισμού})^{\text{χρόνια μελέτης}} = \text{Τιμή Σήμερα} \Rightarrow$$

$$682.01 * (1 + 0.0427)^{25} = y \Rightarrow$$

$$y = 682.01 * 1.0427^{25} \Rightarrow y = 682.01 * 2.84 = \$ \mathbf{1936.90 / MT}$$

Σενάριο 2:

Επιπρόσθετα, αναφορικά με το πετρέλαιο αν θεωρήσουμε ένα ποσοστό μείωσης -2%, δηλαδή θεωρήσουμε ότι η τιμή του πέσει σε βάθος 25 ετών, τότε με βάση τους υπολογισμούς μας θα διαμορφωθεί η τιμή ως ακολούθως:

$$\text{Παρελθοντική τιμή} * (1 + \% \text{ πληθωρισμού})^{\text{χρόνια μελέτης}} = \text{Τιμή Σήμερα} \Rightarrow$$

$$682.01 * (1 - 0.02)^{25} = y \Rightarrow$$

$$y = 682.01 * 0.98^{25} \Rightarrow y = 682.01 * 0.6 = \$ \mathbf{409.21 / MT}$$

Σενάριο 3:

Επίσης, αν θεωρήσουμε ένα ποσοστό πληθωρισμού 8%, δηλαδή μεγαλύτερο από αυτό που έχει μεσολαβήσει μέχρι σήμερα, τότε η τιμή του πετρελαίου σε βάθος 25 ετών θα διαμορφωθεί ως ακολούθως:

$$\text{Παρελθοντική τιμή} * (1 + \% \text{ πληθωρισμού})^{\text{χρόνια μελέτης}} = \text{Τιμή Σήμερα} \Rightarrow$$

$$682.01 * (1 + 0.08)^{25} = y \Rightarrow$$

$$y = 682.01 * 1.08^{25} \Rightarrow y = 682.01 * 6,84 = \$ \mathbf{4,664.95 / MT}$$

4.3.4.2.2 Πράσινη Μεθανόλη (Αναλογία Πράσινης Μεθανόλης & MGO)

Αναφορικά με την τιμή της πράσινη μεθανόλη θα λάβουμε υπόψη το διάγραμμα 24 της παρούσας εργασίας, που έχει ληφθεί από βιβλιογραφία (IRENA, 2021).

Η τιμή της πράσινης μεθανόλης ωστόσο θα επιβαρυνθεί και από την τιμή του πιλοτικού καυσίμου κατά ποσοστό αναλογίας 5% που απαιτείται για την καύση της μεθανόλης. Όμως επειδή δε μπορούμε να ξέρουμε πως θα εξελιχθεί η τιμή του πιλοτικού καυσίμου μέχρι το 2050 και πως η εξέλιξη της τιμής του θα συνδυαστεί με την εξέλιξη της τιμής της πράσινης μεθανόλης μέχρι το 2050, θα χρησιμοποιήσουμε και τα τρία ποσοστά πληθωρισμού (μεταβολής) με αποτέλεσμα να προκύψουν τρεις διαφορετικές τιμές πιλοτικού καυσίμου τις οποίες με ποσοστό 5% θα τις προσθέσουμε στην εκάστοτε τιμή πράσινης μεθανόλης. Άρα για 3 διαφορετικά σενάρια εξέλιξης της τιμής πράσινης μεθανόλης θα προκύψουν 9 τιμές συνδυασμού πράσινης μεθανόλης και πιλοτικού καυσίμου από τις οποίες θα πάρουμε ένα μέσο όρο ανά τριάδα και έτσι θα έχουμε πάλι μια ανά σενάριο (σύνολο τρεις).

Ο λόγος που επιλέγεται αυτός ο τρόπος υπολογισμού και μελέτης είναι διότι η προσθήκη πιλοτικού καυσίμου στη καύση της μεθανόλης είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό, ενώ παράλληλα η ανάλυση επικεντρώνεται στην μελέτη της πράσινης μεθανόλης και όχι την εξέλιξη του πιλοτικού καυσίμου.

Άρα:

Με μεταβολή τής τιμής +4,27% θα έχουμε:

$$\text{Παρελθοντική τιμή} * (1 + \% \text{πληθωρισμού})^{\text{χρόνια μελέτης}} = \text{Τιμή Σήμερα} \Rightarrow$$

$$742 * (1 + 0.0427)^{25} = y \Rightarrow$$

$$y = 742 * 1.0427^{25} \Rightarrow y = 742 * 2.84 = \$ 2107,28 / \text{MT}$$

Με μεταβολή τής τιμής -2,00% θα έχουμε:

$$\text{Παρελθοντική τιμή} * (1 + \% \text{πληθωρισμού})^{\text{χρόνια μελέτης}} = \text{Τιμή Σήμερα} \Rightarrow$$

$$742 * (1 - 0,02)^{25} = y \Rightarrow$$

$$y = 742 * 0,98^{25} \Rightarrow y = 742 * 0.6 = \$ 445,20 / \text{MT}$$

Με μεταβολή τής τιμής +8,00% θα έχουμε:

$$\text{Παρελθοντική τιμή} * (1 + \% \text{πληθωρισμού})^{\text{χρόνια μελέτης}} = \text{Τιμή Σήμερα} \Rightarrow$$

$$742 * (1 + 0.08)^{25} = y \Rightarrow$$

$$y = 742 * 1.08^{25} \Rightarrow y = 742 * 6.848 = \$ 5081,57 / \text{MT}$$

Έτσι, σύμφωνα με τις παραπάνω τρεις τιμές πιλοτικού καυσίμου θα ισχύουν τα ακόλουθα σενάρια, στα οποία σενάρια όμως θα πολλαπλασιάσουμε το κόστος της μεθανόλης και με ένα συντελεστή της θερμογόνου δύναμης, λαμβάνοντας υπόψη και τη σχέση μεθανόλης με VLSFO αλλά και μεθανόλης με MGO. Αυτός ο συντελεστής θα ονομάζεται LCV equivalent (LCVeq) και προκύπτει από την αναλογία τύπου και ποσότητας καυσίμου:

$$\begin{aligned} LCVeq &= \text{αναλογία MGO} * LCV \frac{MGO}{CH_4OH} + \text{αναλογία VLSFO} * LCV \frac{VLSFO}{CH_4OH} \\ &= 0.57 * 2.14 + 0.43 * 2.03 = 1.21 + 0.87 = 2.08 \end{aligned}$$

Σενάριο 1:

Η τιμή της μεθανόλης θα μειωθεί μέχρι το 2050, η αγορά να ωριμάσει και επομένως η τιμή της στα επόμενα χρόνια θα μειωθεί και να φτάσει στο ανώτερο επίπεδο των χαμηλών τιμών που είναι τα **\$ 630 / MT**.

Παράλληλα, η τιμή του πιλοτικού καυσίμου θα διαμορφωθεί:

$$\begin{aligned} \text{Τιμή Πιλοτικού Καυσίμου} &= \frac{\text{Άθροισμα τιμών πιλοτικού καυσίμου}}{3} = \\ \text{Τιμή Πιλοτικού Καυσίμου} &= \frac{2107,28 + 445,20 + 5081,57}{3} = \frac{7634,05}{3} \\ &= \$ 2544,68 \end{aligned}$$

Άρα η τιμή της πράσινης μεθανόλης θα διαμορφωθεί ως:

Τιμή Πράσινης Μεθανόλης

$$\begin{aligned} &= LCVeq * \text{τιμή πράσινης μεθανόλης} \\ &+ \text{ποσοστό πιλοτικού καυσίμου} * \text{τιμή πιλοτικού καυσίμου} \\ &= 2,08 * 630 + 0,05 * 2544,68 = 1310,40 + 127,23 = \$1437,63 \end{aligned}$$

Σενάριο 2:

Η τιμή της μεθανόλης θα παραμείνει υψηλή μέχρι το 2050, η αγορά δε θα ωριμάσει και επομένως αντί η τιμή της στα επόμενα χρόνια να μειωθεί τελικά να φτάσει στο ανώτερο επίπεδο των **\$1650 / MT**.

Παράλληλα, η τιμή του πιλοτικού καυσίμου θα διαμορφωθεί:

$$\text{Τιμή Πιλοτικού Καυσίμου} = \frac{\text{Άθροισμα τιμών πιλοτικού καυσίμου}}{3} =$$

$$\begin{aligned} \text{Τιμή Πιλοτικού Καυσίμου} &= \frac{2107,28 + 445,20 + 5081,57}{3} = \frac{7634,05}{3} \\ &= \$ 2544,68 \end{aligned}$$

Άρα η τιμή της πράσινης μεθανόλης θα διαμορφωθεί ως:

Τιμή Πράσινης Μεθανόλης

$$\begin{aligned} &= LCVe_q * \text{τιμή πράσινης μεθανόλης} \\ &+ \text{ποσοστό πιλοτικού καυσίμου} * \text{τιμή πιλοτικού καυσίμου} \\ &= 2,08 * 1650 + 0,05 * 2544,68 = 3432 + 127,23 = \$ 3599,23 \end{aligned}$$

Σενάριο 3:

Η τιμή της μεθανόλης να παραμείνει υψηλή μέχρι το 2050, η αγορά να μην ωριμάσει και επομένως αντί η τιμή της στα επόμενα χρόνια να μειωθεί τελικά να φτάσει στο ανώτερο επίπεδο των **\$250 MT**.

Παράλληλα, η τιμή του πιλοτικού καυσίμου θα διαμορφωθεί:

$$\begin{aligned} \text{Τιμή Πιλοτικού Καυσίμου} &= \frac{\text{Άθροισμα τιμών πιλοτικού καυσίμου}}{3} = \\ \text{Τιμή Πιλοτικού Καυσίμου} &= \frac{2107,28 + 445,20 + 5081,57}{3} = \frac{7634,05}{3} \\ &= \$ 2544,68 \end{aligned}$$

Άρα η τιμή της πράσινης μεθανόλης θα διαμορφωθεί ως:

Τιμή Πράσινης Μεθανόλης

$$\begin{aligned} &= LCVe_q * \text{τιμή πράσινης μεθανόλης} \\ &+ \text{ποσοστό πιλοτικού καυσίμου} * \text{τιμή πιλοτικού καυσίμου} \\ &= 2,08 * 250 + 0,05 * 2544,68 = 520 + 127,23 = \$647,23 \end{aligned}$$

4.3.4.2.3 Δικαιώματα Ρύπανσης (EUAs)

Τα επόμενα χρόνια, οι τιμές των Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων (EUAs) αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά, κυρίως λόγω των αυστηρότερων κλιματικών στόχων που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η σταδιακή μείωση του αριθμού των διαθέσιμων δικαιωμάτων στην αγορά (μέσω του μηχανισμού Market Stability Reserve) αυξάνει τη σπανιότητα τους, ασκώντας πίεση στις τιμές. Παράλληλα, η μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας και η ενσωμάτωση περισσότερων τομέων στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών (ETS), όπως η

ναυτιλία που εντάχθηκε πρακτικά από το 2024, ενισχύουν τη ζήτηση για EUAs. Ως αποτέλεσμα, οι τιμές των δικαιωμάτων αναμένεται να αυξηθούν, λειτουργώντας ως κίνητρο για τις εταιρείες να μειώσουν τις εκπομπές τους και να επενδύσουν σε πράσινες τεχνολογίες.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση και την πρόβλεψη της μελέτης των (Gabin MANTULET, Aurélien PEFREN, Sylvain CAIL, 2023) η τιμή των EUAs αναμένεται να φτάσει στα 500 Ευρώ ο τόνος (Εικόνα 4, σελίδα 8). Από την άλλη, υπάρχει και μελέτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης που προηγείται αυτής η οποία αναφέρει ότι η τιμή των δικαιωμάτων ρύπανσης/εκπομπών θα φτάσει και θα κυμαίνεται κατά το 2050 στα 100 Ευρώ ο τόνος (Prof. P. Capros, A. De Vita, N. Tasios, D. Papadopoulos, P. Siskos, E. Apostolaki, M. Zampara, L. Paroussos, K. Fragiadakis, N. Kouvaritakis, et al., 2013).

Άρα η τιμή των δικαιωμάτων ρύπανσης θα ακολουθήσει τα ακόλουθα σενάρια:

Σενάριο 1: Υψηλή τιμή για τα δικαιώματα ρύπανσης / εκπομπών

Ευρώ 500 / EUA = 1 mt CO₂

Σε αναλογία 1,09 Ευρώ δολαρίου θα ισχύει ότι η τιμή διαμορφώνεται \$ 545 / EUAs = 1 MT CO₂

Σενάριο 2: Χαμηλή τιμή για τα δικαιώματα ρύπανσης / εκπομπών

Ευρώ 100 / EUA = 1 mt CO₂

Σε αναλογία 1,09 Ευρώ δολαρίου θα ισχύει ότι η τιμή διαμορφώνεται \$ 109 / EUAs = 1 MT CO₂

Σενάριο 3: Ενδιάμεση τιμή για τα δικαιώματα ρύπανσης / εκπομπών (μέσος όρος των δύο παραπάνω)

$$\text{Τιμή EUAs} = \frac{500 + 100}{2} = \frac{600}{2} = \text{Ευρώ 300}$$

Ευρώ 300 / EUA = 1 mt CO₂

Σε αναλογία 1,09 Ευρώ δολαρίου θα ισχύει ότι η τιμή διαμορφώνεται \$ 327 / EUAs = 1 MT CO₂

4.3.4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΙΛΥΩΝ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΝΑ ΤΑ ΕΤΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σε αυτή την ενότητα θα συνοψίσουμε το συνολικό κόστος που προκύπτει από κάθε ένα από τα σενάρια μελέτης τόσο για την αναλογία VLSFO / MGO αλλά και CH4O / MGO. Η σύνοψη αυτή θα περιλαμβάνει τόσο το κόστος αγοράς του καυσίμου όσο και την επιβάρυνση από τον κανονισμό του EU ETS. Παράλληλα, θα λάβουμε υπόψη και το FUEL EU κόστος όπου αυτό εμφανίζεται.

Η εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί για όλα τα σενάρια είναι η ακόλουθη:

Συνολικό Κόστος(1)

$$\begin{aligned}
 &= \text{Κοστός Αναλογίας Καυσίμου (\$/fuel MT)} \\
 &+ \text{Κόστος Δικαιωμάτων Εκπομπών (\$/CO2 MT)} \\
 &* \text{Cf Αναλογίας Καυσίμου (gCO2/g fuel) + Κόστος fuelEU (\$/fuel MT)}
 \end{aligned}$$

Στην παραπάνω εξίσωση έχουμε όλες τις μεταβλητές υπολογισμένες για τα 3 διαφορετικά σενάρια ανά περίπτωση εκτός από το κομμάτι που αναφέρεται στον κανονισμό του Fuel EU. Αυτό θα υπολογιστεί μόνο για την αναλογία του VLSFO / MGO μιας και για την πράσινη μεθανόλη το πέναλτι είναι μηδενικό τόσο για την πρώτη χρονιά όσο και για όλα τα χρόνια μελέτης,

Για την αναλογία VLSFO / MGO και τον υπολογισμό του κόστους που αφορά στον κανονισμό του Fuel EU ισχύει ότι στην περίπτωση των ενδο-ευρωπαϊκών ταξιδιών θα είναι:

$$\text{Fuel EU Penalty (100\%)} = \frac{\text{Compliance Balance (gCO2e)} * 2400 \text{ (Euro)}}{41000 \text{ (MJ)} * \text{Actual GHG Intensity (gCO2e/MJ)}}$$

Ενώ στην περίπτωση των ταξιδιών από και προς την Ευρώπη θα είναι:

$$\text{Fuel EU Penalty (50\%)} = \frac{\text{Compliance Balance (gCO2e)} * 2400 \text{ (Euro)}}{41000 \text{ (MJ)} * \text{Actual GHG Intensity } \left(\frac{\text{gCO2e}}{\text{MJ}} \right)} * 0,5$$

Άρα αν όλα τα ταξίδια ήταν ενδο-ευρωπαϊκά το συνολικό πέναλτι (για ένα χρόνο) θα ήταν:

$$\begin{aligned} \text{Fuel EU Penalty (100\%)} &= \frac{806,509,632 * 2400}{41000 * 91.098} = \frac{1,935,623,116,800}{3,735,018} \\ &= 518,236.60 \text{ Ευρώ} \end{aligned}$$

Σημειώνεται ότι οι αριθμοί αναφορικά με το compliance balance και το actual GHG intensity προκύπτουν από το κεφάλαιο 4, ενότητα 4.3.2, πίνακας 12.

Στην περίπτωση αυτό το κόστος ανά τόνο αν όλα τα ταξίδια ήταν εντός Ευρώπης θα ήταν:

$$\text{Κόστος ανά τόνο} = \frac{518,237}{10,921} = 47,45 \text{ Ευρώ / MT}$$

Από την άλλη το συνολικό κόστος αν όλα τα ταξίδια ήταν από και προς Ευρώπη (για ένα χρόνο) θα ήταν:

$$\begin{aligned} \text{Fuel EU Penalty (50\%)} &= \frac{806,509,632 * 2400}{41000 * 91.098} * 0.5 = \frac{1,935,623,116,800}{3,735,018} * 0.5 \\ &= 259,118 \text{ Euro} \end{aligned}$$

Και αντίστοιχα το κόστος ανά τόνο αν όλα τα ταξίδια ήταν από και προς την Ευρώπη θα ήταν:

$$\text{Κόστος ανά τόνο} = \frac{259,118}{10,921} = 23,7 \text{ Ευρώ / MT}$$

Στη πραγματικότητα, σύμφωνα με τους υπολογισμούς για τις καταναλώσεις (VLSFO & MGO) για τα Ευρωπαϊκά Ταξίδια σχετικά με τον κανονισμό του FuelEU που έγιναν στο κεφάλαιο 4, ενότητα 4.3.2 ισχύει ότι το σύνολο των καταναλώσεων εντός Ευρωπαϊκών Λιμανιών και μεταξύ Ευρωπαϊκών Λιμανιών είναι 841,27 MT που αντιστοιχούν σε κόστος πέναλτι **Ευρώ 39,918 (τιμή ανά τόνο 47,45 Ευρώ)**, ενώ το σύνολο των καταναλώσεων από και προς τα Ευρωπαϊκά Λιμάνια είναι 10,080 MT που αντιστοιχούν σε κόστος πέναλτι **Ευρώ 238,901 (τιμή ανά τόνο 23,7 Ευρώ)**

Άρα το συνολικό πέναλτι για την αναλογία VLSFO/MGO αναφορικά με τον κανονισμό του Fuel EU είναι:

$$\text{Συνολικό Πέναλτι FuelEU} = 238,901 + 39,918 = \text{Ευρώ 278,819}$$

(86% από και προς ΕΕ και 14% εντός ΕΕ)

Η εναλλακτικά:

$$\begin{aligned} \text{Κόστος Fuel EU} &= \frac{(841,27 * 47,45) + (10,080 * 23,7)}{10921,27} = \frac{39,918 + 238,901}{10921,27} \\ &= 25,52 \text{ ευρώ} / MT \end{aligned}$$

Έχοντας όλα τα κόστη τώρα υπολογισμένα, μπορούμε να επιστρέψουμε στην εξίσωση (1) παραπάνω και να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος ανά περίπτωση αναλογίας και σεναρίου για VLSFO / MGO & CH4O / MGO θεωρώντας 3 διαφορετικές τιμές για τα EUAs κάθε φορά και επιπλέον το κόστος του Fuel EU όπου πρέπει να υπολογιστεί. Παράλληλα έχοντας μετατρέψει και μέσω του LCVeq και τη μεθανόλη σε VLSFO και MGO αναλογία θα μπορέσουμε στη συνέχεια να βγάλουμε διαγραμματικά τα συμπεράσματα μας.

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία VLSFO / MGO – Σενάριο 1

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 1 (}\alpha\text{)} &= 1936,90 + 545 * 3,166 + 25,52 * 1,09 \\ &= 1936,90 + 1725,47 + 27,81 = \$ 3690,18 / MT \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 1 (}\beta\text{)} &= 1936,90 + 109 * 3,166 + 25,52 * 1,09 \\ &= 1936,90 + 345,09 + 27,81 = \$ 2309,8 / MT \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 1 (}\gamma\text{)} &= 1936,90 + 327 * 3,166 + 25,52 * 1,09 \\ &= 1936,90 + 1035,28 + 27,81 = \$ 2999,99 / MT \end{aligned}$$

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία VLSFO / MGO – Σενάριο 2

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 2 (}\alpha\text{)} &= 409,21 + 545 * 3,166 + 25,52 * 1,09 \\ &= 409,21 + 1725,47 + 27,81 = \$ 2162,49 / MT \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 2 (}\beta\text{)} &= 409,21 + 109 * 3,166 + 25,52 * 1,09 \\ &= 409,21 + 345,09 + 27,81 = \$ 782,11 / MT \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 2 (}\gamma\text{)} &= 409,21 + 327 * 3,166 + 25,52 * 1,09 \\ &= 409,21 + 1035,28 + 27,81 = \$ 1472,3 / MT \end{aligned}$$

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία VLSFO / MGO – Σενάριο 3

$$\text{Σενάριο 3 } (\alpha) = 4664,95 + 545 * 3,166 + 25,52 * 1,09$$

$$= 4664,95 + 1725,47 + 27,81 = \$ 6418,23 / MT$$

$$\text{Σενάριο 3 } (\beta) = 4664,95 + 109 * 3,166 + 25,52 * 1,09$$

$$= 4664,95 + 345,09 + 27,81 = \$ 5039,23 / MT$$

$$\text{Σενάριο 3 } (\gamma) = 4664,95 + 327 * 3,166 + 25,52$$

$$= 4664,95 + 1035,28 + 27,81 = \$ 5728,04 / MT$$

Τώρα θα υπολογίσουμε τα αντίστοιχα κόστη για την αναλογία Πράσινης Μεθανόλης και Ντίζελ χρησιμοποιώντας όμως ως τιμή κόστους Πράσινης μεθανόλης τις τιμές που βρήκαμε λίγο παραπάνω χρησιμοποιώντας τον συντελεστή LCVeq. Έτσι θα έχουμε:

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία CH4O / MGO – Σενάριο 1

$$\text{Σενάριο 1 } (\alpha) = 1437,63 + 545 * 1,535 + 0 = 1437,63 + 836,73 = \$ 2274,36 / MT$$

$$\text{Σενάριο 1 } (\beta) = 1437,63 + 109 * 1,535 + 0 = 1437,63 + 167,34 = \$ 1604,97 / MT$$

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 1 } (\gamma) &= 1437,63 + 327 * 1,535 + 0 = 1437,63 + 502,04 \\ &= \$ 1939,67 / MT \end{aligned}$$

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία CH4O / MGO – Σενάριο 2

$$\text{Σενάριο 2 } (\alpha) = 3599,23 + 545 * 1,535 + 0 = 3599,23 + 836,73 = \$ 4435,96 / MT$$

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 2 } (\beta) &= 3599,23 + 109 * 1,535 + 0 = 3599,23 + 167,34 \\ &= \$ 3766,57 / MT \end{aligned}$$

$$\text{Σενάριο 2 } (\gamma) = 3599,23 + 327 * 1,535 + 0 = 3599,23 + 502,04 = \$ 4101,27 / MT$$

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία CH4O / MGO – Σενάριο 3

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 3 (α)} &= 647,23 + 545 * 1,535 + 0 = 647,23 + 836,73 \\ &= \$ 1510,96 / MT \end{aligned}$$

$$\text{Σενάριο 3 (β)} = 647,23 + 109 * 1,535 + 0 = 647,23 + 167,34 = \$ 814,57 / MT$$

$$\begin{aligned} \text{Σενάριο 3 (γ)} &= 647,23 + 327 * 1,535 + 0 = 647,23 + 502,04 \\ &= \$ 1149,27 / MT \end{aligned}$$

Τέλος, προκειμένου να δημιουργήσουμε το διάγραμμα που θα μας βοηθήσει να συμπεράνουμε αν και κατά πόσο και σε ποιο χρονικό και χρηματικό σημείο θα συμφέρει η χρήση των πράσινων / εναλλακτικών καυσίμων είναι τα δύο σημεία που παρουσιάζουν το σήμερα τόσο για την αναλογία τόσο για VLSFO / MGO όσο και CH4O / MGO.

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία VLSFO / MGO – Σήμερα

$$\begin{aligned} \text{Σήμερα συνολικό Κόστος} &= \\ &= \text{Τιμή αναλογίας VLSFO \& MGO Σήμερα} \\ &+ \text{Τιμή Δικαιωμάτων ρύπανσης εκπομπών} \\ &* \text{συντελεστή Ευρώ Δολλαρίου} * \text{Συντελεστής CO2 αναλογίας} \\ &+ \text{κόστος για το FuelEU} = 682,01 + (60.50 * 1,09 * 3,166) + 0 \\ &= 682,01 + 208,78 = 890,79 \end{aligned}$$

Συνολικό Κόστος για την Αναλογία CH4O / MGO – Σήμερα

Για το προσδιορισμό του συνολικού κόστους σήμερα (2024) θα πρέπει πρώτα να πολλαπλασιάσουμε την τιμή του καυσίμου της πράσινης μεθανόλης και πάλι με το νέο συντελεστή θερμογόνου δύναμης (LCVeq) για να «μεταφράσουμε» την πράσινη μεθανόλη σε αναλογία VLSFO / MGO και στη συνέχεια να προσθέσουμε το κόστος το δικαιωμάτων ρύπανσης και το κόστος από το fuel EU που όμως είναι μηδέν. Άρα:

$$\begin{aligned} \text{Τιμή αναλογίας Πράσινης Μεθανόλης \& MGO Σήμερα} &= \\ &= \text{LCVeq} * \text{τιμή πράσινης μεθανόλης Σήμερα} \\ &+ \text{ποσοστό πιλοτικού καυσίμου} * \text{τιμή πιλοτικού καυσίμου Σήμερα} \\ &= 2,08 * 1220 + 0,05 * 742 = 2537,6 + 37,1 = \$ 2575,7 \end{aligned}$$

Άρα το συνολικό κόστος σήμερα θα ισούται με:

Σήμερα συνολικό Κόστος

$$\begin{aligned}
 &= \text{Τιμή αναλογίας Πράσινης Μεθανόλης \& MGO Σήμερα} \\
 &+ \text{Τιμή Δικαιωμάτων ρύπανσης εκπομπών} \\
 &* \text{συντελεστή Ευρώ Δολλαρίου} * \text{Συντελεστής CO2 αναλογίας} \\
 &+ \text{κόστος για το FuelEU} = 2575,7 + (60.50 * 1,09 * 1,535) + 0 \\
 &= 1257,1 + 208,78 = \$ 2676.92
 \end{aligned}$$

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς και τα επιμέρους σενάρια που αναλύθηκαν προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που αποτυπώνει πως θα εξελιχθεί το κόστος το 2050 τόσο για την περίπτωση του VLSFO & MGO όσο και για την περίπτωση της πράσινης Μεθανόλης (e-CH₄OH) σε συνδυασμό με το πιλοτικό καύσιμο. Φυσικά στα αποτελέσματα αυτά η αποτύπωση των σεναρίων της πράσινης μεθανόλης έχουν λάβει υπόψη και την θερμογόνο δύναμη αναλογίας σε VLSFO & MGO προκειμένου να γίνει η σύγκριση. Παράλληλα αξίζει να σημειωθεί ότι για τη διαγραμματική αποτύπωση των τιμών έγινε χρήση του τύπου της γραμμικής παρεμβολής που αποτυπώνει την εξέλιξη των τιμών στη διάρκεια των ετών από το έτος 0 (2024) μέχρι το έτος 2050 που είναι το έτος στόχος για την εν λόγω μελέτη.

Αυτό σημαίνει ότι για την ανάλυση και την εξέλιξη των τιμών δεν λαμβάνεται υπόψη η οποιαδήποτε αυξομείωση του πληθωρισμού και κατ' επέκταση ούτε ο επανατοκισμός σε αυτόν.

Πίνακας 18: Αποτύπωση σεναρίων μελέτης για την εξέλιξη του κόστους το 2050

| <i>Επιμέρους Σεναρία</i> | Κόστος 2024 (\$/MT fuel) | Κόστος 2050 (\$/MT fuel) |
|---|------------------------------------|------------------------------------|
| <i>(7) VLSFO/MGO σενάριο 1 (για EUA 545)</i> | 890,79 | 3690,18 |
| <i>(10) VLSFO/MGO σενάριο 1 (για EUA 109)</i> | 890,79 | 2309,8 |
| <i>(8) VLSFO/MGO σενάριο 1 (για EUA 327)</i> | 890,79 | 2999,99 |
| <i>(11) VLSFO/MGO σενάριο 2 (για EUA 545)</i> | 890,79 | 2162,49 |
| <i>(17) VLSFO/MGO σενάριο 2 (για EUA 109)</i> | 890,79 | 782,11 |
| <i>(14) VLSFO/MGO σενάριο 2 (για EUA 327)</i> | 890,79 | 1472,3 |
| <i>(1) VLSFO/MGO σενάριο 3 (για EUA 545)</i> | 890,79 | 6418,23 |

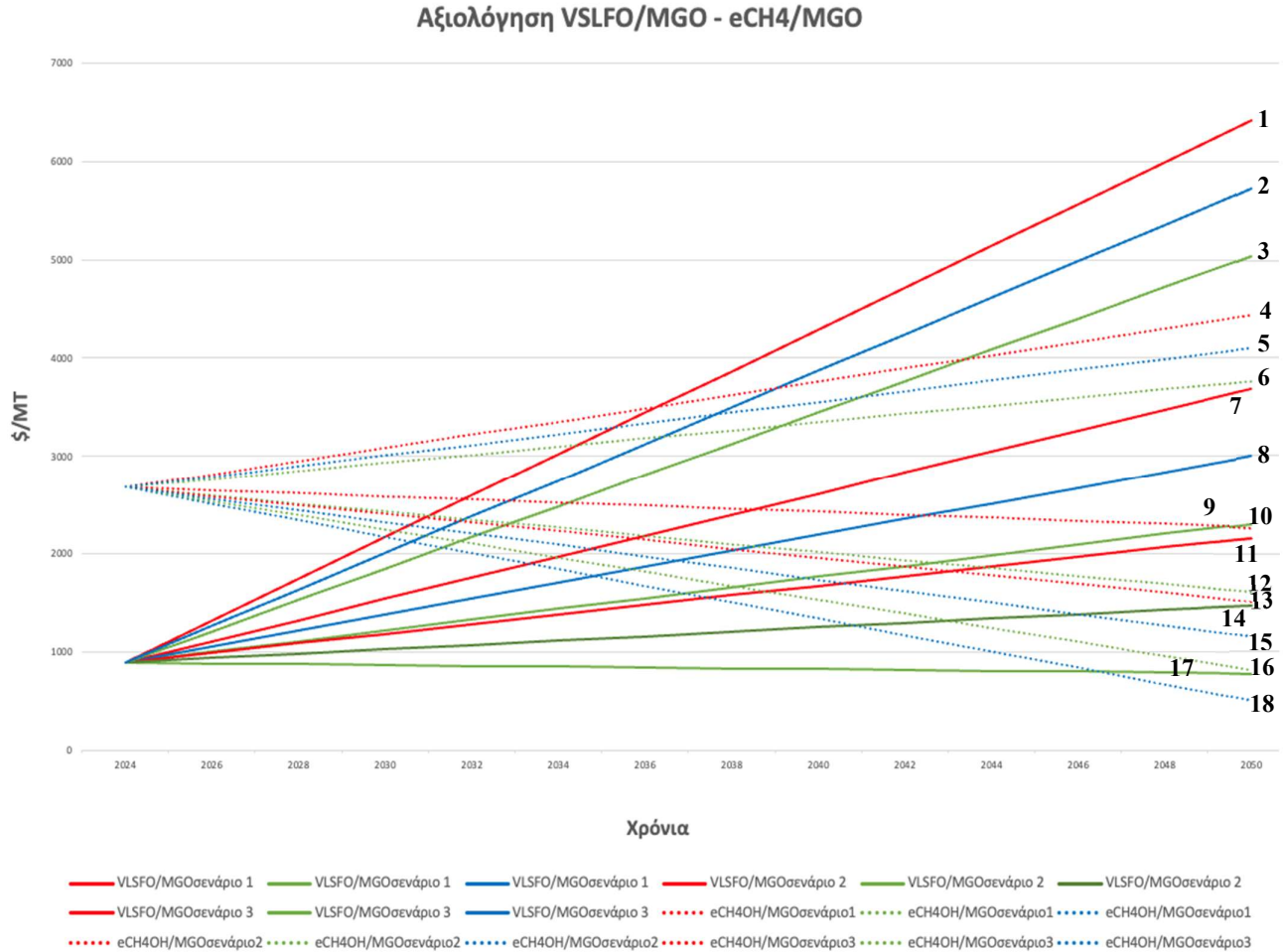
| | | |
|---|---------|---------|
| (3) VLSFO/MGO σενάριο 3 (για EUA 109) | 890,79 | 5039,23 |
| (2) VLSFO/MGO σενάριο 3 (για EUA 327) | 890,79 | 5728,04 |
| (9) eCH4OH/MGO σενάριο1 (για EUA 545) | 2676,92 | 2274,36 |
| (12) eCH4OH/MGO σενάριο1 (για EUA 109) | 2676,92 | 1604,97 |
| (18) eCH4OH/MGO σενάριο1 (για EUA 327) | 2676,92 | 502,04 |
| (4) eCH4OH/MGO σενάριο2 (για EUA 545) | 2676,92 | 4435,96 |
| (6) eCH4OH/MGO σενάριο2 (για EUA 109) | 2676,92 | 3766,57 |
| (5) eCH4OH/MGO σενάριο2 (για EUA 327) | 2676,92 | 4101,27 |
| (13) eCH4OH/MGO σενάριο3 (για EUA 545) | 2676,92 | 1510,96 |
| (16) eCH4OH/MGO σενάριο3 (για EUA 109) | 2676,92 | 814,57 |
| (15) eCH4OH/MGO σενάριο3 (για EUA 327) | 2676,92 | 1149,27 |

Πηγή: Εμού του ιδίου

Στη συνέχεια και με βάση τις παραπάνω τιμές (πίνακες 18) που προέκυψαν από το 2024 μέχρι το 2050 δημιουργήσαμε ένα διάγραμμα προκειμένου να αξιολογήσουμε τη Πράσινη Μεθανόλη και το Πετρέλαιο ως μελλοντικά καύσιμα για το πλοίο μελέτης μας. Το διάγραμμα αυτό στον οριζόντιο άξονα μετράει τα χρόνια και στον κάθετο άξονα το κόστος (\$/MTfuel).¹⁰

¹⁰ Fuel στην μία περίπτωση ορίζουμε την αναλογία VLSFO/MGO και στην άλλη την αναλογία CH4OH/MGO έχοντας όμως «μεταφράσει» την πράσινη μεθανόλη σε VLSFO & MGO χρησιμοποιώντας την θερμότητα δύναμη.

Διάγραμμα 26: Αξιολόγηση Πράσινης Μεθανόλης και Πετρελαίου ως μελλοντικό καύσιμο



Πηγή: Εμού του ίδιου

Στο παραπάνω διάγραμμα με διακεκομμένες γραμμές αποτυπώνονται οι καμπύλες της πράσινης μεθανόλης με το πιλοτικό καύσιμο για όλα τα σενάρια που αναλύσαμε, ενώ με ενιαία γραμμή οι καμπύλες για τα σενάρια του πετρελαίου (VLSFO & MGO). Επιπλέον, παρατηρώντας το διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχουν τρία διαφορετικά χρώματα καμπυλών. Κόκκινο, Πράσινο και Μπλε. Κάθε ένα από τα χρώματα αυτά περιγράφει ένα διαφορετικό σενάριο συνδυασμένο με μια τιμή EUA. Το κόκκινο χρώμα αποτυπώνει ένα σενάριο Πράσινης μεθανόλης ή πετρελαίου συνδυασμένα με μια *ψηλή* τιμή στα EUA, το μπλε χρώμα ένα σενάριο Πράσινης μεθανόλης ή πετρελαίου συνδυασμένα με μια *μεσαία* τιμή στα EUA και το πράσινο χρώμα ένα σενάριο Πράσινης μεθανόλης ή πετρελαίου συνδυασμένα με μια *χαμηλή* τιμή στα

ΕΥΑ. Όσον αφορά την αρίθμηση των καμπυλών, για αυτή γίνεται αναφορά στον πίνακα 18 παραπάνω.

Το διάγραμμα απεικονίζει μια περιοχή που οροθετείται από τα σημεία Α, Β, Γ, Δ και αντιπροσωπεύει τις συνθήκες στις οποίες η πράσινη μεθανόλη, σύμφωνα με τα σενάρια που αναλύθηκαν, θα μπορούσε να αποτελέσει καύσιμο του μέλλοντος για την εν λόγω μελέτη. Φυσικά, αυτή η εκτίμηση βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές και συνθήκες, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

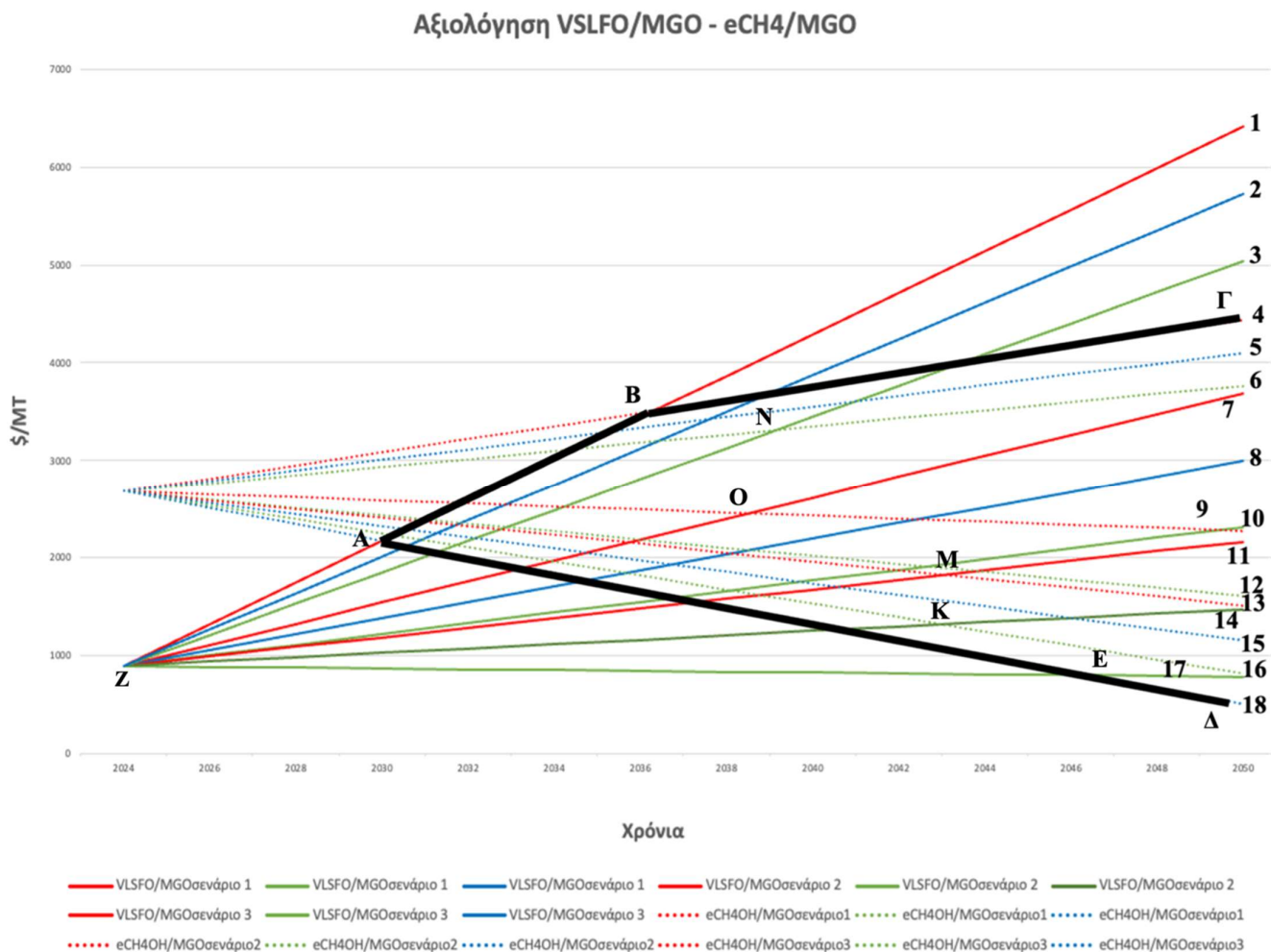
Μία από τις βασικές παραδοχές είναι ότι η οικονομική ανάλυση που διενεργείται στην παρούσα μελέτη εξετάζει αποκλειστικά τις τιμές των καυσίμων, ως φωτογραφία των τιμών σε δεδομένη χρονική στιγμή, χωρίς να λαμβάνει υπόψη την αρχική κεφαλαιακή επιβάρυνση του πλοιοκτήτη για την αγορά ενός πλοίου που θα καταναλώνει πράσινη μεθανόλη, σε σχέση με ένα παραδοσιακό πλοίο που χρησιμοποιεί συμβατικά καύσιμα. Έτσι, στην παρούσα ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη το κόστος της τεχνολογίας ή οι ανάγκες σε υποδομές που απαιτούνται για την πλήρη υιοθέτηση της πράσινης μεθανόλης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την οικονομική βιωσιμότητα της λύσης σε μελλοντικούς χρονικούς ορίζοντες. Είναι το λεγόμενο εμπροσθοβαρές κόστος το οποίο θα επηρέαζε πολύ την απόφαση ενός πλοιοκτήτη για την απόκτηση ενός πλοίου που καταναλώνει πράσινη μεθανόλη όμως δεν αποτελεί κομμάτι της παρούσας μελέτης.

Από την άλλη πλευρά, μια επιπλέον παραδοχή αφορά τη δυνατότητα ενός πλοιοκτήτη να επιλέξει την εγκατάσταση ενός συστήματος scrubber, με σκοπό την συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και τη μείωση του λειτουργικού κόστους. Η εγκατάσταση ενός scrubber επιτρέπει τη χρήση βαρύτερου μαζούτ (IFO380), το οποίο είναι οικονομικότερο από άλλες κατηγορίες πετρελαίου, γεγονός που θα μετατόπιζε τις καμπύλες κόστους του πετρελαίου σε χαμηλότερα επίπεδα. Σε αυτή την περίπτωση, η χρήση βαρύτερου μαζούτ θα καθιστούσε την πράσινη μεθανόλη λιγότερο ανταγωνιστική σε σχέση με το συμβατικό καύσιμο (τουλάχιστον από μια πρώτη σκοπιά), καθώς οι καμπύλες κόστους του πετρελαίου θα μετακινηθούν προς τα κάτω, επηρεάζοντας τα σημεία τομής με τις καμπύλες πράσινης μεθανόλης γεγονός που θα καθυστερούσε πιθανότατα την χρονική στιγμή που η πράσινη μεθανόλη θα μπορούσε να γίνει οικονομικά συμφέρουσα εναλλακτική λύση για τον πλοιοκτήτη.

Επομένως, η δυνατότητα εφαρμογής της πράσινης μεθανόλης ως καυσίμου θα μπορούσε να αναβληθεί για ένα μεταγενέστερο χρονικό διάστημα, εξαρτώμενη από τις εξελίξεις στην τιμή των καυσίμων και την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών όπως το scrubber. Η ανάλυση αυτή δείχνει ότι η πραγματική δυνατότητα υιοθέτησης της πράσινης μεθανόλης εξαρτάται από πλήθος παραμέτρων που σχετίζονται τόσο με τις τεχνολογικές εξελίξεις όσο και με τις οικονομικές συνθήκες της αγοράς, οι οποίες μπορεί να διαμορφώσουν το τοπίο των ναυτιλιακών καυσίμων στο μέλλον.

Ωστόσο υπάρχουν κάποια άμεσα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από το διάγραμμα που ακολουθεί (εικόνα 19).

Εικόνα 19: Αξιολόγηση Πράσινης Μεθανόλης και Πετρελαίου 2



Πηγή: Εμού του ίδιου

Αρχικά, αυτό που παρατηρούμε από το διάγραμμα στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 19), είναι ότι υπάρχει ένα σημείο τομής (Σημείο A) των διακεκομμένων καμπυλών της πράσινης μεθανόλης και του πετρελαίου. Αυτό είναι το σημείο από το οποίο και μετά,

η πράσινη μεθανόλη θα μπορούσε να αποτελεί μια λύση για την εν λόγω μελέτη. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί στο έτος 2030. Άρα μέχρι και το 2030 στην εν λόγω μελέτη η πράσινη μεθανόλη δεν αποτελεί λύση συμφέρουσα για τον πλοιοκτήτη.

Επιπλέον, για οποιοδήποτε σημείο μέσα στην περιοχή που ορίζει το «τρίγωνο» ΖΑΔ η πράσινη μεθανόλη, σε όποιο σενάριο εξέλιξης της τιμής της και αν την αξιολογήσουμε, και σε οποιαδήποτε χρονιά από το έτος 2024 μέχρι το 2050 δεν αποτελεί λύση μιας και το πετρέλαιο πάντα θα συμφέρει περισσότερο (οι καμπύλες του πετρελαίου είναι πιο χαμηλά από αυτές της πράσινης μεθανόλης). Ωστόσο, στην περιοχή αυτή μελέτης, το ευθύγραμμο τμήμα ΕΔ είναι ένα κομμάτι που ένα μόνο σενάριο πράσινης μεθανόλης θα μπορούσε από το 2046 και μετά να αποτελεί λύση (Καμπύλη 18 - eCH₄OH/MGO σενάριο για τιμή EUA \$327).

Από την άλλη πλευρά αυτό που μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε από την εικόνα 19 είναι ότι όποιο σημείο και αν επιλέξουμε να αξιολογήσουμε πάνω από το ευθύγραμμο τμήμα ΒΓ η πράσινη μεθανόλη θα είναι πάντα συμφέρουσα σε οποιοδήποτε σενάριο μελέτης της με την προϋπόθεση βέβαια ότι το πετρέλαιο θα ακολουθούσε την πορεία των καμπυλών 1, 2 ή 3.

Επιπρόσθετα, αναφορικά με την περιοχή που οριοθετείται από τα σημεία Α, Β, Γ, Δ, υπάρχουν πολλά σημεία όπου η πράσινη μεθανόλη θα μπορούσε να αποτελεί μια βιώσιμη εναλλακτική λύση για τον πλοιοκτήτη, σε κάποιες συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Ωστόσο, είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι, αν συνδέσουμε τη χρονική περίοδο της μελέτης (2024-2050) με το προσδόκιμο ζωής ενός πλοίου, το οποίο κυμαίνεται γύρω από τα 25 έτη, τότε η απόφαση για την υιοθέτηση της πράσινης μεθανόλης πρέπει να ληφθεί ήδη από το 2024. Αυτή η χρονική συγκυρία καθίσταται ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς η εφαρμογή της πράσινης μεθανόλης ως καύσιμο φαίνεται να καταστεί συμφέρουσα μόνο μετά το 2030 όπως φαίνεται και από το διάγραμμα (σημείο Α). Επομένως, το ερώτημα που τίθεται είναι εάν ο πλοιοκτήτης θα είναι σε θέση να αποσβέσει την επένδυση στην πράσινη μεθανόλη, αν αυτή επιλεγεί σήμερα (2024), δεδομένου ότι η αποδοτικότητα της λύσης εκτιμάται ότι θα πραγματοποιηθεί σε πιο μελλοντικό χρόνο.

Αυτό αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία όταν εξετάζουμε σημεία όπως το Κ ή το Μ, που ανήκουν στην περιοχή ΑΒΓΔ και αφορούν σημεία τομής για ίδια τιμή EUA για τη πράσινη μεθανόλη και το πετρέλαιο αντίστοιχα. Αυτά τα σημεία υποδεικνύουν ότι η

πράσινη μεθανόλη θα μπορούσε να αποτελέσει οικονομικά συμφέρουσα επιλογή γύρω από το 2043-2044. Ωστόσο, αν λάβουμε υπόψη το προσδόκιμο ζωής του πλοίου (περίπου 25 χρόνια), αυτή η χρονική περίοδος θα ήταν αργά για τον πλοιοκτήτη, καθώς θα είχε ήδη ολοκληρώσει τη λειτουργία του πλοίου του και δε θα είχε καταφέρει να αποσβέσει την αρχική επένδυση στην πράσινη μεθανόλη. Αυτή η αναλογία καταδεικνύει την κρισιμότητα της χρονικής συγκυρίας κατά την οποία ο πλοιοκτήτης πρέπει να πάρει την απόφαση, καθώς η αποδοτικότητα μιας τέτοιας επένδυσης εξαρτάται από το κατά πόσο η απόσβεση μπορεί να γίνει εντός της διάρκειας ζωής του πλοίου.

Συνεπώς, είναι κατανοητό ότι, ακόμη και μέσα στην επιθυμητή περιοχή (ΑΒΓΔ), όπου η πράσινη μεθανόλη φαίνεται να είναι μια ελκυστική λύση, η οικονομική βιωσιμότητά της μπορεί να μην είναι απόλυτα εξασφαλισμένη για κάθε σενάριο. Πράγματι, αν η αξιολόγηση της λύσης περιοριστεί μόνο στην οικονομική διάσταση χωρίς να ληφθούν υπόψη άλλοι κρίσιμοι παράγοντες, όπως η κεφαλαιακή επένδυση για τον εξοπλισμό του πλοίου και η διάρκεια απόσβεσης, τότε η επιλογή της πράσινης μεθανόλης μπορεί να μην είναι συμφέρουσα. Για παράδειγμα, η εφαρμογή σημείων όπως το Κ ή το Μ, αν και παρουσιάζουν μια ελκυστική οικονομική πρόταση σε κάποιο σημείο του μέλλοντος, ενδέχεται να αποδειχθούν ανέφικτες για τους πλοιοκτήτες, λόγω των χρονικών περιορισμών που σχετίζονται με την απόσβεση των επενδύσεων.

Αντίθετα, σημεία όπως το Ν ή το Ο, τα οποία φαίνονται να προδιαγράφουν μια ταχύτερη απόσβεση της επένδυσης, καθιστούν τη χρήση της πράσινης μεθανόλης πιο ελκυστική για τον πλοιοκτήτη νωρίτερα. Στην περίπτωση αυτή, η αρχική κεφαλαιακή επιβάρυνση θα μπορούσε να αποσβεστεί σε ένα πολύ νωρίτερα χρονικό σημείο, καθιστώντας την πράσινη μεθανόλη πιο ανταγωνιστική ως επιλογή, ακόμη και με τα δεδομένα των τρεχουσών συνθηκών της αγοράς.

Επομένως, ενώ η πράσινη μεθανόλη μπορεί να φανεί ως μια ελκυστική και περιβαλλοντικά φιλική λύση για το μέλλον, η απόφαση για την υιοθέτησή της από τους πλοιοκτήτες εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων, με την πιο κρίσιμη να είναι το χρονικό πλαίσιο και η ικανότητα απόσβεσης της επένδυσης εντός του προσδόκιμου της ζωής του πλοίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, άλλες τεχνολογίες ή καύσιμα, όπως το βαρύ μαζούτ με scrubber, μπορεί να αποτελούν πιο συμφέρουσες επιλογές βραχυπρόθεσμα, παρόλο που η πράσινη μεθανόλη παραμένει μια υποσχόμενη λύση για το μέλλον.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επιλογή του κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου για εφαρμογή στη ναυτιλία δεν είναι καθόλου εύκολη και σίγουρα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Με μια γρήγορη ματιά σε όσα αναφέρθηκαν παραπάνω στην παρούσα εργασία θα μπορούσε κάποιος να συμπεράνει ότι στα καύσιμα στα οποία δεν υπάρχει άτομο άνθρακα στη χημική τους σύνθεση, όπως η αμμωνία και το υδρογόνο, η βιωσιμότητα τους και ο ρόλος τους στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας εξαρτάται άμεσα από τον τρόπο παραγωγής τους και μάλλον είναι πιο βιώσιμες επιλογές από άποψη ρύπων. Είναι όμως μόνο αυτό που μετράει τελικά; Η απάντηση είναι όχι. Η επιλογή του καυσίμου για μια ναυτιλιακή εταιρία είτε πρόκειται για μετασκευή πλοίου είτε πρόκειται για νεότευκτο πλοίο είναι μια τεχνοοικονομική και παράλληλα περιβαλλοντική και κοινωνική επιλογή (PESTEL).

Ως καύσιμο, η μεθανόλη το 2010 ήταν ανταγωνιστική ως προς το κόστος αλλά σήμερα βρίσκεται σε μειονεκτική θέση σε σύγκριση με το χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο πετρέλαιο εσωτερικής καύσης (MGO) ή και το αργό πετρέλαιο VLSFO. Στη συνέχεια, με τη πάροδο του χρόνου σημειώθηκε πτώση της τιμής του MGO και του VLSFO σαν αποτέλεσμα της μείωσης του πετρελαίου παγκοσμίως. Όταν η τιμή του πετρελαίου θα αυξηθεί, είναι αναμφισβήτητο ότι τα παράγωγα του όπως το MGO θα αυξηθούν και αυτά. Ωστόσο, ενώ η τιμή της πράσινης μεθανόλης είναι υψηλή σήμερα, η ανάλυση μας έδειξε ότι υπάρχουν περιπτώσεις και σενάρια μελέτης κάτω από τα οποία τελικά στο μέλλον μπορεί να φτάσει και σε σημεία χαμηλότερα από το πετρέλαιο. Συγκεκριμένα, είδαμε ότι από το 2030 και μετά η πράσινη μεθανόλη εμφανίζει μια περιοχή/εύρος μελέτης με πολύ περισσότερες εναλλακτικές και πιθανότητα επιλογής της έναντι του πετρελαίου. Με δεδομένο αυτό, είναι λογικό να αντισταθμίσουμε την τιμή των καυσίμων και τους κινδύνους που συνεπάγεται η αστάθεια των τιμών τους και να χρησιμοποιήσουμε σε ορισμένα πλοία εναλλακτικά καύσιμα όπως η πράσινη μεθανόλη.

Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι η λύση κινητήρα διπλού καυσίμου επιτρέπει τη χρήση MGO και μεθανόλης ταυτόχρονα, δίνοντας τη δυνατότητα στο πλοίο για εναλλαγή μεταξύ καυσίμων για να λειτουργήσει οικονομικότερα παραμένοντας σε συμμόρφωση. Άρα οικονομικά οι διακυμάνσεις στις τιμές των παραδοσιακών καυσίμων μπορούν να επηρεάσουν τη ζήτηση για πράσινη μεθανόλη και το ανάποδο.

Παράλληλα, υπάρχει ανάγκη για επενδύσεις σε υποδομές και παραγωγή πράσινης μεθανόλης που ενώ έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες και υλοποιήσεις απαιτούνται περισσότερες. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί αν οι υποδομές για προμήθεια πράσινης μεθανόλης είναι περιορισμένες αυτό ταυτόχρονα περιορίζει και τον «εμπορικό χάρτη» για τον εν λόγω πλοίο. Όσο λιγότερα λιμάνια προμήθειας πράσινης μεθανόλης τόσο πιο περιορισμένος είναι και ο αριθμός των θαλάσσιων δρόμων για το εν λόγω πλοίο.

Εξετάζοντας τον οικονομικό παράγοντα λίγο πιο διεξοδικά και με βάση την ανάλυση που έγινε παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αν οι τιμές αγοράς της πράσινης μεθανόλης δεν μειωθούν, τότε σίγουρα παρότι σε επίπεδο ρύπων γίνεται εξοικονόμηση, η πράσινη μεθανόλη, οικονομικά, δεν θα αποτελεί μια συμφέρουσα επιλογή. Με χρονικό ορίζοντα το 2030 ωστόσο, όπου σύμφωνα με την ανάλυση η πράσινη μεθανόλη έχει κόστος αγοράς και περιβαλλοντικό κόστος \$2175,02 έναντι του \$2676,92 (έτος 2024) φαίνεται από πρώτης άποψης ότι μια μείωση 23% είναι αρκετή για να αρχίσει ο πλοιοκτήτης να την αξιολογεί ως πιθανή λύση.

Από την άλλη πλευρά αξίζει να αναφερθεί ότι και σε επίπεδο επένδυσης (αν και για την ανάλυση δεν έχει ληφθεί υπόψη το κεφαλαιακό κόστος) ότι μια συμφωνία με τις τράπεζες σε έναν ενδεχόμενο δανεισμό για την αγορά ενός πλοίου που θα καταναλώνει πράσινη μεθανόλη μπορεί να συμφέρει μιας και οι τράπεζες σήμερα πριμοδοτούν τις κινήσεις και αποφάσεις πλοιοκτητών για περιβαλλοντικά βελτιωμένα πλοία τόσο όσον αφορά τη κατασκευή τους όσο και ως προς το καύσιμο που καταναλώνουν, αν αυτό είναι λιγότερο βλαβερό, επιφέροντας καλύτερα αποτελέσματα απέναντι στους κανονισμούς (πχ. Προσφορά καλύτερων τόκων από την τράπεζα).

Από κοινωνικής πλευράς και ασφάλειας, η μεθανόλη είναι τοξική για τους ανθρώπους, ιδίως όταν καταναλώνεται από το στόμα, κάτι που ωστόσο σπάνια συμβαίνει κατά την χρήση του καυσίμου. Για τους υδρόβιους οργανισμούς, ωστόσο, είναι σχεδόν μη τοξική. Σε περίπτωση διαρροών, η μεθανόλη διαλύεται πολύ γρήγορα στο θαλασσινό νερό και οι ατμοί που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα επίσης διασκορπίζονται πολύ γρήγορα ενώ οι κατευθυντήριες γραμμές ασφάλειας για τη μεθανόλη στον ναυτιλιακό τομέα είναι ήδη σε εφαρμογή και υπάρχουν πλοία που λειτουργούν και την καταναλώνουν. Στο πλαίσιο αυτό φαίνεται ότι είναι το λιγότερο επικίνδυνο καύσιμο, ακόμα και σε σύγκριση με τα σημερινά συμβατικά καύσιμα, γεγονός που την κάνει πιο προσιτή από άποψης προστασίας του περιβάλλοντος.

Στο κομμάτι των κανονισμών που διέπουν τη Ναυτιλία, το CII (Carbon Intensity Indicator) είναι σημαντικό αλλά μόνος του ως δείκτης δεν αποτελεί παρά μόνο ένα στατιστικό στοιχείο, επειδή δεν περιλαμβάνει το φάσμα Well-to-Wake αλλά μόνο το φάσμα Tank-to-Wake και άρα δεν αντικατοπτρίζει πλήρως την πραγματικότητα. Άρα ένα υψηλότερο CII με χρήση μεθανόλης από μόνο του δεν αποτελεί παράγοντα καθορισμού του καυσίμου από πλευράς του πλοιοκτήτη. Η πράσινη μεθανόλη άπαξ και μπει στη δεξαμενή του πλοίου λειτουργεί όπως και η συμβατική μεθανόλη, αυτό που τη διαφοροποιεί όμως έναντι άλλων καυσίμων είναι το κομμάτι της παραγωγής της. Άρα μόνο αν τη συγκρίνουμε σε όλο το φάσμα, Well-to-Wake, με άλλα καύσιμα μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα. Σύμφωνα με το κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας, αποδείχτηκε ότι το υπό-μελέτη πλοίο αν καταναλώσει πράσινη μεθανόλη τότε είναι απόλυτα συμβατό με τον κανονισμό του FuelEU και δεν θα επιφέρει κανένα πέναλτι στη ναυτιλιακή εταιρία σε αντίθεση με τη καύση του αργού πετρελαίου. Άρα και από περιβαλλοντικής σκοπιάς είναι μια λύση που μπορεί να προσφέρει από το έτος 0 (2024) τη λύση για περιβαλλοντική υπακοή στους κανονισμούς.

Από την άλλη πλευρά και αναφορικά με τον τομέα της τεχνολογίας και ανάπτυξης πλοίων και μηχανών που μπορούν να καταναλώνουν μεθανόλη, παρατηρείται τεράστια πρόοδος στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και διαδικασιών που καθιστούν την παραγωγή της μεθανόλης πιο αποδοτική τα τελευταία χρόνια. Παράλληλα σημειώνονται και βήματα πολλά στην παραγωγή και αποθήκευση μεθανόλης (συμπεριλαμβανομένης και της πράσινης μεθανόλης), καθώς και στην ανάπτυξη κινητήρων που χρησιμοποιούν αυτήν. Τόσο η MAN όσο και η Wartsila παρέχουν ήδη τη δυνατότητα καύση αυτού του καυσίμου εδώ και αρκετό καιρό και αναμένεται να μας παρέχουν και νέες λύσεις τα επόμενα χρόνια.

Ένα μεγάλο ίσως και το μεγαλύτερο κίνητρο για τους ερευνητές και τους πλοιοκτήτες όσον αφορά τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων (μέσα στα οποία είναι και η μεθανόλη) είναι σίγουρα η επιβολή κανονισμών και περιορισμών εκπομπών από κράτη και οργανισμούς, με σημαντικότερο στόχο μείωσης εκπομπών CO₂ μέχρι το 2050 και την όλο και πιο συχνή δημιουργία των περιοχών με χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών (ECA Areas). Σε επίπεδο μεθανόλης δεν υπάρχουν κανονισμοί που να έχουν προσαρμοστεί πλήρως στις ιδιότητες της, ωστόσο υπάρχουν οι κανονισμοί από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό αλλά και την Ευρωπαϊκή Ένωση που οδηγούν τα πλοία προς την καύση αυτών των εναλλακτικών καυσίμων. Στο πλαίσιο αυτό της πολιτικής

σκηνης δεν θα μπορούσαμε να μην επισημάνουμε τα Ερευνητικά Προγράμματα που υλοποιούνται κυρίως στην βόρεια Ευρώπη αλλά και την Κίνα αναφορικά με την χρηματοδότηση έργων και ερευνών σχετικών με τη μεθανόλη και την ανάπτυξη της ως θαλάσσιου καυσίμου. Όλο και περισσότεροι σταθμοί παραγωγής τόσο συμβατικής αλλά και πράσινης μεθανόλης δημιουργούνται και όλο και περισσότερες δοκιμές υλοποιούνται.

Επιπλέον, η χρήση μεθανόλης στα πλοία συμβάλλει στην εκπλήρωση των στόχων ESG, προσφέροντας περιβαλλοντική βιωσιμότητα, κοινωνική υπευθυνότητα και ισχυρή διακυβέρνηση. Καθώς οι κανονισμοί για τη μείωση των εκπομπών θεωρούνται ζωτικής σημασίας, η εστίαση στη μεθανόλη μπορεί να ενισχύσει τις στρατηγικές βιωσιμότητας των ναυτιλιακών εταιρειών, καθιστώντας την μια ελκυστική επιλογή για το μέλλον του κλάδου. Ωστόσο, σημαντικό εδώ είναι να αναφερθεί ότι ο ανθρώπινος παράγοντας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο μιας και δυστυχώς τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μείωση στα εκπαιδευμένα πληρώματα. Η εγκατάσταση και χρήση ενός εναλλακτικού καυσίμου όπως είναι η μεθανόλη απαιτεί εκπαίδευση, και κατάρτιση, μιας και το οποιοδήποτε λάθος επί του πλοίου μπορεί να έχει πολύ άσχημα αποτελέσματα για την υγεία και την ασφάλεια των ανθρώπων επί αυτού. Το ίδιο απαιτείται φυσικά και από τους ανθρώπους του γραφείου μιας και οι κατευθυντήριες γραμμές ξεκινούν από το γραφείο και καταλήγουν στο πλοίο.

Είναι προφανές ότι το μελλοντικό μείγμα καυσίμων θα είναι πιο ποικιλόμορφο από την τρέχουσα κυριαρχία 97% των καυσίμων που προέρχονται από πετρέλαιο σε όλους τους τομείς της ναυτιλιακής αγοράς. Η πράσινη μεθανόλη (e-methanol), ως πιο βιώσιμη από την συμβατική μεθανόλη, θα μπορούσε να παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτό. Το ακριβές μερίδιο της στο μείγμα καυσίμων θα καθοριστεί από αρκετούς όμως παράγοντες: την κλιμάκωση της παραγωγής πράσινης μεθανόλης, τη μείωση του κόστους ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και, κατά συνέπεια, του κόστους του καυσίμου, καθώς και την αποδοχή της μεθανόλης στον ναυτιλιακό τομέα.

Τα χρόνια έως περίπου το 2030 θα είναι πιθανώς κρίσιμα, καθώς αυτή η πενταετία θα αποφασίσει πού θα γίνουν οι επενδύσεις. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής θα πρέπει επομένως να εφαρμόσουν τα κατάλληλα κίνητρα το συντομότερο δυνατόν. Από τη μία πλευρά, θα είναι σημαντικό να διασφαλιστεί η τροφοδοσία e-methanol στον τομέα της ναυτιλίας. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει από την μία πλευρά την υποστήριξη για επενδύσεις σε εργοστάσια παραγωγής πράσινης μεθανόλης ή τη χρήση CCfDs και από

την άλλη πλευρά, οι ευρωπαίοι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής θα πρέπει να διασφαλίσουν ένα φιλόδοξο αποτέλεσμα του πακέτου Fit-for-55, δηλαδή της πρωτοβουλίας FuelEU Maritime, με ισχυρά κίνητρα για RFNBOs καύσιμα. Στο πλαίσιο αυτό η πράσινη μεθανόλη (e-methanol) έχει χαμηλούς περιβαλλοντικούς κινδύνους σε σύγκριση με άλλα μελλοντικά καύσιμα και μπορεί να προσφέρει επαρκή ενεργειακή κάλυψη για τις περισσότερες διαδρομές. Αυτό και με προϋπόθεση τη σταθεροποίηση των τιμών προς τα κάτω θα μπορούσε να την καταστήσει ένα καύσιμο μέλλοντος για την Ναυτιλία.

Ωστόσο, θα ήθελα να κλείσω την εργασία αυτή λέγοντας πως η κάθε περίπτωση απαιτεί διαφορετικές προσαρμογές που πρέπει να γίνουν στα συστήματα αποθήκευσης και πρόωσης του πλοίου. Αυτές με τη σειρά τους εξαρτώνται από τις φυσικοχημικές ιδιότητες των καυσίμων, το ενεργειακό τους περιεχόμενο, τα διαθέσιμα δίκτυα διανομής, την επικινδυνότητα, την τοξικότητα και πολλά άλλα. Ο δρόμος προς την επιλογή του κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου είναι μακρύς και πολλά υποσχόμενος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σπυρίδων, Ρ. (2018). *Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στη Ναυτιλία με Σκοπό τη Συμμόρφωση με τους Διεθνείς Κανονισμούς Ρύπων*. Αθήνα: Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Βλάχος, Γ. Π. (2011). *Ναυτιλιακή Οικονομική*. Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε.
- Μπήλιος, Γ. (2018). *Εκπομπές Αέριων Ρύπων και παγκόσμια ναυτιλία. Η περίπτωση της Ελληνικής ακτοπλοΐας - Προσπάθειες εναρμόνισης με το ισχύον νομικό καθεστώς της Ευρωπαϊκής Ένωσης*. Κύπρος: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Λιάρος, Α. (2021). *ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΠΛΟΙΑ*. Κοζάνη: Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
- Κωνσταντίνος, Σ. (2021). *Αξιολόγηση εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων: Βιβλιογραφική επισκόπηση και εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.
- Ernest Czermański, A. O.-J. (2022). Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An important but costly step towards ocean protection. *Marine Policy* 145 (2022) 105259, σσ. 1-11.
- Χρύσα, Μ. (2020). *Σύγκριση των συστημάτων EU-MRV και IMO-DCS για τον έλεγχο των εκπομπών του CO2 από την ναυτιλία*. ΧΙΟΣ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ.
- Puisa, R. (2023, 07 09). *Research Gate*. Ανάκτηση από Phases for reduction factors of EEDI: https://www.researchgate.net/figure/Phases-for-reduction-factors-of-EEDI-adopted-from-59_fig32_279447378
- Γκέργκες, Μ. (2022). *The European MRV Regulation on CO2 emissions and the IMO International Regulation on the Data Collection System (DCS) for fuel consumption on board ships. Objectives, implementation and estimated impact on the reduction of air pollution from ships*. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής .
- Διαμάντης, Λ. (2023). *ΔΙΕΘΝΗΣ ΑΓΟΡΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΙΣΤΟΡΙΚΟ, ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑ ΤΟΠΙΚΗ ΑΓΟΡΑ*. Πειραιάς: Πανεπιστήμιο Πειραιώς .
- ΙΟΒΕ. (2022). *Επίδραση της δέσμης προτάσεων “Fit for 55” στην επιβατηγό ναυτιλία και στη νησιωτική Ελλάδα*. Αθήνα: ΙΔΡΥΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ.
- ΚΟΡΦΙΑΤΗΣ, Γ. (2022). *Ανάλυση Κύκλου Ζωής Ναυτιλιακών Καυσίμων Σε Σενάρια Πραγματικών Συνθηκών και Καταστάσεων Πλεύσης*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
- Shipping), D. (. (2022, September 10th). <https://www.dromon.com/>. Ανάκτηση από Dromon Bureau of Shipping: <https://www.dromon.com/wp-content/uploads/2022/12/Dromon-TP-on-EEDI-EEXI.pdf>
- Ernest Czermański, A. O.-J. (2022, NA NA). Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An important but costly step towards ocean protection. *Marine Policy*, σσ. 145-155.
- OMBOGA, H. K. (2022). *ERA OF DECARBONIZATION, ENERGY EFFICIENCY ON EXISTING SHIPS (EEXI) AND CARBON INTENSITY INDICATOR (CII) IMPLICATION ON CHARTER PARTIES*. SWEDEN: WORLD MARITIME UNIVERSITY.

- Omboga, H. K. (2022, October 10). Era of decarbonization, energy efficiency on existing ships (EEXI) and carbon intensity indicators (CII) implication on charter parties . *World Maritime University*, σ. NA.
- THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE. (χ.χ.). RESOLUTION MEPC.339(76) (adopted on 17 June 2021) 2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY RATING OF SHIPS (CII RATING GUIDELINES, G4).
- (MEPC), T. M. (2021, 06 17). *2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY - CII GUIDELINES G1, G2, G3, G4*. (MEPC), THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE.
- ΗΛΙΑΣ, Δ. (2023). *ΠΡΑΣΙΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ SCRUBBERS*. Αιγάλεω : Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής & Πανεπιστήμιο Χίου.
- Παναγιώτης, Λ. Ι. (2017). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΛΟΙΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΑΚΤΟΠΛΟΙΑΣ ,ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ*. Αιγάλεω: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής .
- ΜΑΡΙΑ, Μ. (2022). *ΠΡΑΣΙΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. Χίος: Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Ατμόσφαιρας, Δ. Κ. (2023, December Saturday). *Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών*. Ανάκτηση από Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας: <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/systema-eborias-dikaionaton-ekpobon/>
- RINA, S. B. (2023, December Saturday). *Understanding EU ETS and its Impact on the Shipping Industry*. Ανάκτηση από Sertica By Rina: <https://www.sertica.com/>
- Class, N. (2023). *EU-ETS for Shipping*. Marine GHG Certification Department Class NK.
- Χρήστος-Δημοσθένης, Α. (2021). *Εναλλακτικά καύσιμα ναυτιλίας για προσαρμογή στις νέες προδιαγραφές*. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
- Περιβόλας, Κ. (2021). *Καύσιμα του μέλλοντος: Η περίπτωση της Μεθανόλης*. ΧΙΟΣ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ.
- Affairs, T. E. (2023). *FuelEU Maritime Regulation - How does it affect the maritime sector?* BERLIN: NOW GMBH .
- Shipping, V. (2024, 04 28). *Verifavia Shipping*. Ανάκτηση από Verifavia Shipping: <https://www.verifavia-shipping.com/shipping-carbon-emissions-verification/service-fueleu-maritime-370.php>
- ZADKOVICH, Z. F. (2023). *GUIDE TO FUELEU MARITIME*. London: ZEILER FLOYD ZADKOVICH.
- Φαρμάκη, Ε. (2023). *ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ, ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΚΑΙ ΕΤΑΙΡΙΚΗ ΔΙΑΚΥΒΕΡΝΗΣΗ (ESG) ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ*. Τμήμα Ναυπηγών. Αιγάλαω: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
- Holm, R. (2024). *Sustainable fuels for shipping by 2050 – the 3 key elements of success*. WARTSILA.
- Shipowners, U. ο. (2021). *Survey of Alternative Fuels-Technologies for Shipping*. Greece: Union of Greek Shipowners.
- Marquez, C. (2023). *MARINE METHANOL - Future-Proof Shipping Fuel*. Methanol Institute.
- Gerwin Zomer, S. F. (2020). *Green Maritime Methanol - Operation aspects and the fuel supply chain*. Netherlands: TNO - Innovation for Life.
- Απόστολος, Α. (2022). *Οικονομική Αξιολόγηση της Χρήσης Μεθανόλης ως Εναλλακτικού Καυσίμου σε Πλοία*. Πειραιάς: Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

- Dolan, D. G. (2021). *INNOVATION OUTLOOK - Renewable Methanol*. Abu Dhabi: IRENA & METHANOL INSTITUTE.
- Martin Svanberg, J. E. (2018). Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1217-1228.
- Worley, T. (2022). *The Success of Synergies: The complementary potential of pairing American ethanol producers with e-methanol production*. North Sydney, Australia: The Worley.
- Klein, T. (February 2020). *Methanol: A Future-Proof Fuel: A Primer Prepared for the Methanol Institute*. Future Fuel Strategies.
- Olufsen, C. (2023). *A Sustainable Methanol Ship Fuel Supply Chain for the Maritime Industry*. Νορβηγία : University of South-East Norway .
- ClassNK, T. I. (2023). *Adoption of the FuelEU Maritime Regulation*. Japan: Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK).
- Chiara Mingozzi, I. U. (2023). *How does FuelEU Maritime work? T&E explainer of the new EU shipping fuel Regulation*. T&E explainer of the new EU shipping fuel Regulation.
- ΕΛΙΣΑΒΕΤ, Ε. (2022). *ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ*. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ: ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.
- Κασιμάτης, Α. (2021). *Η μεθανόλη σαν ναυτιλιακό καύσιμο - προβλήματα και προοπτικές*. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής: Σχολή Ναυπηγών Μηχανικών.
- Αγγελίδης, Α. (2022). *Εναλλακτικές πηγές ενέργειας στην ναυτιλία*. Μακεδονία: Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας.
- Ζέρβος, Γ. (2021). *Προοπτικές χρήσης μεθανόλης ως εναλλακτικό καύσιμο σε πλοία*. Μακεδονία: Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού - Σχολή Μηχανικών .
- Fenwick, A. (2021). *Green methanol*. UK: Nitrogen & Syngas magazine.
- ΕΥΘΥΜΙΑΔΟΥ, Ε. (2023). *ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ*. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ: ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ.
- Hughes, E. &. (2016). *Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility*. Norway: DNV Rules .
- B&W, T. M. (2020). *The Methanolfuelled MAN B&W LGIM Engine*. Denmark: The MAN Energy Solutions.
- Nora Wissner, S. H. (2023). *Methanol as a marine fuel*. Berlin: Publication commissioned by Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) .
- Institute, M. (2024, 09 02). *Methanol Institute: Supply and Demand*. Ανάκτηση από Methanol Institute: Supply and Demand: <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/>
- IRENA. (2021). *Innovation Outlook : Renewable Methanol*,. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.: Methanol Institute & Irena.
- LlyodsRegister. (2023). *FUEL FOR THOUGHT Methanol for Passenger Ships*. United Kindom: Llyods Register.
- MAERSK. (2023). *The Maersk Methanol Vessels*. Denmark: MAERSK.
- Netpas, S. (2024, 09 29). Netpas Software.
- B&W, M. (2024). *MAN B&W Two-stroke engine operating on ammonia*. Denmark: MAN B&W.

- Ship and Bunker. (2024, 10 18). *Ship and Bunker*. Ανάκτηση από Ship and Bunker: <https://shipandbunker.com/prices>
- Methanol Institute. (2021). *Innovation Outlook: RENEWABLE METHANOL*. Abu Dhabi: IRENA.
- Ρίγος, Ν. (2022). *The effect of Engine Power Limitation on the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)*. Athens: NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS.
- MEPC 76/15 Add.2 Annex12, 2. (2021, 06 17). Ανάκτηση από 2021 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY REDUCTION FACTORS RELATIVE TO REFERENCE LINES (G3): <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/seemp-mepc338-76.pdf>
- MEPC 78/17/Add.1 Annex 15, 2. (2022, 06 19). *2022 GUIDELINES ON THE REFERENCE LINES FOR USE WITH OPERATIONAL CARBON INTENSITY INDICATORS (CII REFERENCE LINES GUIDELINES, G2)*. Ανάκτηση από <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/seemp-mepc78-353.pdf>
- MEPC78/17/Add/1, 2. (2022, 06 10). *2022 GUIDELINES ON THE OPERATIONAL CARBON INTENSITY RATING OF SHIPS (CII RATING GUIDELINES, G4)*. Ανάκτηση από <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/seemp-mepc78-354.pdf>
- Official Journal of the European Union, 2. (2018, 12 11). *DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. Ανάκτηση από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1805>
- Official Journal of the European Union, 2. (2023, 09 13). *REGULATION (EU) 2023/1805 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*. Ανάκτηση από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1805>
- Bunker Index*. (2024, 11 03). Ανάκτηση από <https://www.bunkerindex.com>
- Gabin MANTULET, Aurélien PEFFEN, Sylvain CAIL. (2023, 11 09). *Carbon Price forecast under the EU ETS (November 2023)*. Ανάκτηση από Enterdata Intelligence + Consulting: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/carbon-price-forecast-under-eu-ets.pdf>
- Prof. P. Capros, A. De Vita, N. Tasios, D. Papadopoulos, P. Siskos, E. Apostolaki, M. Zampara, L. Paroussos, K. Fragiadakis, N. Kouvaritakis, et al. (2013, 12 16). *EU ENERGY, TRANSPORT AND GHG EMISSIONS TRENDS TO 2050 REFERENCE SCENARIO 2013*. Ανάκτηση από European Commission: https://climate.ec.europa.eu/document/download/5c1f0bd0-0a9f-4bf4-9b21-a866ac6ea9b6_en?filename=eu_trends_2050_en.pdf

(χ.χ.).