

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ
ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΔΟΣΗ ΠΛΟΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιούλιος 2022

ΚΟΥΚΟΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΠΡΟΥΣΑΛΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ: ΚΟΥΡΜΠΕΛΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

Copyright © Κούκος Αθανάσιος, 2022

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ιωάννη Προυσαλίδη για την άψογη συνεργασία, το συντονισμό και την υποστήριξη που παρείχε σε όλα τα στάδια της μελέτης και της συγγραφής. Η συνεχής και άμεση βοήθεια που προσέφερε υπήρξε καθοριστική για το αποτέλεσμα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Θεόδωρο Κουρμπέλη, Client Relationship Manager από τον νηογνώμονα Lloyd's Register, για τη διάθεση πολύτιμων δεδομένων, πληροφοριών και γνώσεων, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε. Η συνεργασία μαζί του υπήρξε καταλυτική για την ομαλή εξέλιξη της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και άλλα κοντινά και αγαπημένα πρόσωπα για την συνεχή στήριξη και ενθάρρυνσή τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το «ανθρωπογενές» φαινόμενο του θερμοκηπίου και η περιβαλλοντική κρίση που βιώνει ο πλανήτης καθιστά επιτακτική την ανάγκη για περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου με πρωταγωνιστή το διοξείδιο του άνθρακα που παράγεται από τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τις ανθρώπινες δραστηριότητες γενικά. Η ναυτιλία ευθύνεται για ένα μεγάλο μέρος των εκπομπών CO₂, επειδή τα πλοία κινούνται με χρήση ορυκτών καυσίμων.

Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα project στο οποίο, σε συνεργασία με το νηογνώμονα Lloyd's Register, επιχειρείται η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με εναλλακτικά καύσιμα σε μια σειρά από πραγματικά πλοία. Σκοπός του project είναι να διαπιστωθεί πόσο μπορεί να μειωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, με τι κόστος για τις εταιρείες και με ποιο κέρδος για τον πλανήτη.

Η εργασία περιλαμβάνει τρία κύρια μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται σε βασικές γραμμές οι όροι και οι έννοιες η γνώση των οποίων προαπαιτείται για την κατανόηση του project. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται το project και ακολουθούν, στο τρίτο μέρος, τα συμπεράσματα που εξάγονται.

Μέθοδος: Το θεωρητικό υπόβαθρο, αναγκαίο για τη γνώση βασικών όρων και εννοιών και την κατανόηση του project και του σκοπού που υπηρετεί, γράφτηκε μέσα από ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και επιστημονικών άρθρων δημοσιευμένων στο διαδίκτυο, από όπου και ανακτήθηκαν. Το project πραγματοποιήθηκε με χρήση του κανονισμού Fuel EU Maritime, που συντάχθηκε πρόσφατα.

Λέξεις κλειδιά: CO₂, ντίζελ, LNG, εναλλακτικά καύσιμα, cold ironing

ABSTRACT

The greenhouse effect and the environmental crisis that the planet is experiencing make it mandatory to reduce greenhouse gas emissions starting carbon dioxide produced by industry, transport and human activities in general. Shipping is responsible for much of the CO₂ emissions, because of the fossil fuels that ships use.

This thesis is actually a real project in which, in cooperation with the maritime classification society Lloyd's Register, an attempt is being made to replace the traditional maritime fossil fuels with alternative fuels in a fleet. The prime goal is to find out how these replacements can help reduce gas emissions that enhance the greenhouse effect and, at the same time, how they can affect the shipping company's expenditures and profits.

This diploma thesis includes three main parts. In the first one, the basic definitions and terms are named, knowledge that is necessary for the reader so he can understand the content and the results that are excluded. In the second part, the project is thoroughly analysed and, in the final part, the results and the conclusions are presented.

Method: The theoretical background, necessary for the knowledge of basic terms and concepts and the understanding of the project and the purpose it serves, was written through a review of literature and scientific articles published on the internet, from where they were retrieved. The project was carried out using the recently drafted Fuel EU Maritime Regulation.

Key words: CO₂, Diesel, LNG, Alternative Fuels, Cold Ironing

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	7
Κεφάλαιο 1: Ναυτιλία και ρύπανση– συνέπειες στο περιβάλλον και τον άνθρωπο	7
Κεφάλαιο 1.1: Είδη ρυπαντών.....	7
Κεφάλαιο 1.2 – Διοξείδιο του άνθρακα CO ₂	7
Κεφάλαιο 1.3: Οξείδια του θείου- SO _x	8
Κεφάλαιο 1.4: Οξείδια του αζώτου– NO _x	9
Κεφάλαιο 1.5: Αιωρούμενα σωματίδια – PM.....	9
Κεφάλαιο 2: Μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος	11
Κεφάλαιο 2.1: Δημιουργία και ιστορική αναδρομή της δράσης της MARPOL	11
Κεφάλαιο 2.2: Μέτρα και δράσεις υπέρ του περιβάλλοντος	13
ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	27
Κεφάλαιο 1: Η εργασία / πρότζεκτ	27
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο.....	28
Κεφάλαιο 2.1: Συμβατικά καύσιμα ναυτιλίας.....	28
Κεφάλαιο 2.2: LNG.....	34
Κεφάλαιο 2.3: Εναλλακτικά καύσιμα	40
Κεφάλαιο 2.3.1: Υδρογόνο	40
Κεφάλαιο 2.3.2: Αμμωνία	46
Κεφάλαιο 2.3.3: Μεθανόλη.....	49
Κεφάλαιο 2.3.4: Βιο-ντίζελ	53
Κεφάλαιο 2.4: Cold Ironing.....	56
Κεφάλαιο 2.5: Fuel EU Maritime regulation.....	63
Κεφάλαιο 2.6: Διευκρινίσεις για καλύτερη κατανόηση του πρότζεκτ.....	71
ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	76
Κεφάλαιο 1: Παράθεση και επεξήγηση αποτελεσμάτων	76
Κεφάλαιο 2: Συμπεράσματα	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ναυτιλία αποτελεί μία από τις αρχαιότερες δραστηριότητες του ανθρώπου. Οι άνθρωποι, θέλοντας να ανακαλύψουν τον κόσμο γύρω τους και να κατοικήσουν σε νέες εκτάσεις γης, ώστε να εξασφαλίσουν τροφή και πρώτες ύλες, στράφηκαν στην θάλασσα και στην κατασκευή και στην χρήση πλοίων. Σύντομα, οι θαλάσσιες μετακινήσεις έλαβαν μεγαλύτερη έκταση, και χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταφορά, όχι μόνο ανθρώπων, αλλά και αγαθών. Δηλαδή, ξεκίνησε το θαλάσσιο εμπόριο. Έχει ανακαλυφθεί ότι από τη νεολιθική εποχή υπήρχε θαλάσσιο εμπόριο σε περιοχές όπως οι Κυκλάδες, η Κρήτη και η Κύπρος. Οι λαοί της Μεσοποταμίας, οι Κυκλαδίτες, οι Μινωίτες, οι Μυκηναίοι και οι Αιγύπτιοι, ήταν λαοί που ασχολήθηκαν εκτεταμένα με το θαλάσσιο εμπόριο.

Η ναυτιλιακή δραστηριότητα και το θαλάσσιο εμπόριο δε σταμάτησε ποτέ, αλλά αναπτύχθηκε ραγδαία μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, χρονικό σημείο που θεωρείται αρχή της σύγχρονης ναυτιλίας. Στο χρονικό διάστημα αυτών των 77 χρόνων τα πλοία έχουν γίνει τεράστια, τα μέσα πρόωσης έχουν εξελιχθεί με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας και η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχει συμβάλει στην αλματώδη ανάπτυξη της ναυτιλίας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 2016 ήταν ενεργά 49.445 πλοία και τον Αύγουστο του 2021 τα πλοία φτάνουν τις 54.973. (Roberts 2021) Επίσης, το 1995 μεταφέρθηκαν 800 εκατομμύρια τόνοι φορτίου, ενώ το 2007 το μεταφερόμενο φορτίο ξεπέρασε τους 8 δισεκατομμύρια τόνους. (Rofrigue J.P., Notteboom T.) Τέλος, έχει υπολογιστεί πως το 80% των προϊόντων και των αγαθών παγκοσμίως μεταφέρονται μέσω της ναυτιλίας. (Clearseas)

Η ναυτιλία σε κάθε εποχή αποτελούσε κεντρικό μοχλό του εμπορίου και της καινοτομίας, όμως όσο οι ναυτιλιακές δραστηριότητες βοηθούν στην ανάπτυξη και την πρόοδο άλλο τόσο απειλούν το περιβάλλον. Οι κίνδυνοι για το περιβάλλον προκύπτουν από τη συνήθη λειτουργία του πλοίου και αφορούν τη ρύπανση των υδάτων με πιθανές διαρροές καυσίμων και την ατμοσφαιρική ρύπανση με τις εκπομπές οξειδίων του θείου και διοξειδίου του άνθρακα από τα καύσιμα. Βεβαίως ρύπανση μπορεί να προκληθεί και κατά τη ναυπήγηση ή τη συντήρηση του πλοίου ή από ατυχήματα. Το ζητούμενο λοιπόν είναι η συμπίεση της ναυτιλίας με τη «βιώσιμη ανάπτυξη», ώστε η ναυτιλιακή δραστηριότητα να μην καταστρέφει το περιβάλλον. Τα τελευταία χρόνια που η κλιματική αλλαγή και οι συνέπειές της απειλούν τον πλανήτη αναλαμβάνονται θεσμικές και νομοθετικές πρωτοβουλίες που όχι μόνο θέτουν ένα αυστηρό πλαίσιο μείωσης της ρύπανσης από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα, αλλά προσβλέπουν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών υψηλότερης ενεργειακής αποδοτικότητας. «Εργαλεία» όπως το EEDI, οι περιοχές ελέγχου εκπομπής (ECAs) κ.α. «επιστρατεύτηκαν» προκειμένου να περιοριστεί η ρύπανση, ενώ, τελευταία, γίνεται μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα, ώστε έτσι να γίνει η ναυτιλία πιο «πράσινη».

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κεφάλαιο 1: Ναυτιλία και ρύπανση- συνέπειες στο περιβάλλον και τον άνθρωπο

Κεφάλαιο 1.1: Είδη ρυπαντών

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους ένα πλοίο μπορεί να ρυπάνει και να μολύνει την ατμόσφαιρα και τη θάλασσα. Αυτοί μπορεί να είναι διαφορετικής μορφής (αέρια, υγρή ή στερεή) και να προκαλούν ζημιά άμεσα, με την απελευθέρωσή τους στο περιβάλλον, ή έμμεσα, έπειτα από αλληλεπίδραση και «συνεργασία» με ουσίες και σωματίδια που ήδη υπάρχουν στο περιβάλλον. Τα κυριότερα «μέσα» με τα οποία η ναυτιλία μολύνει το περιβάλλον είναι τα πετρελαιοειδή, τα θειικά και νιτρικά οξείδια, που εκπέμπονται από τις μηχανές, τα αέρια που συντείνουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, με σημαντικότερα το διοξείδιο του άνθρακα CO₂, μεθάνιο CH₄ και οξείδιο του αζώτου N₂O, τις ουσίες CFC (Halon Chlorofluorocarbons), που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος, τα λύματα και τα απορρίματα, τις δηλητηριώδεις υγρές ουσίες, τα προϊόντα σε μορφή «πακέτων» κ.α. (Σπύρου Κ. 2017)

Κεφάλαιο 1.2 - Διοξείδιο του άνθρακα CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άχρωμο αέριο που παραμένει άοσμο, όταν η συγκέντρωσή του είναι μικρή. Έχει χρησιμοποιηθεί, και συνεχίζει να χρησιμοποιείται, ευρέως σε διάφορους τομείς και συναντάται στην καθημερινή ζωή σε πολλές και ποικίλες εφαρμογές. Χρησιμοποιείται στα ποτά και τα τρόφιμα, στην πυροπροστασία, στις συγκολλήσεις, στα φάρμακα και σε αλλού.

Το CO₂ είναι το σημαντικότερο από τα αέρια που κρατάνε τη γη μας ζεστή. Πριν από 4 δισεκατομμύρια χρόνια η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα της γης ήταν περίπου 80% και μέσω της φωτοσύνθεσης σιγά σιγά ελαττώθηκε και σήμερα ανέρχεται στο 0,03%. Η μεγάλη ποσότητα του CO₂ εγκλωβίστηκε σε οργανισμούς οι οποίοι αργότερα σχημάτισαν στο στερεό φλοιό της γης το πετρέλαιο και τους γαιάνθρακες. Κατά τη διάρκεια του φυσικού κύκλου του CO₂ υπάρχει ισορροπία με τρόπο φυσικό. Το CO₂ παράγεται από την αναπνοή, την αποσύνθεση των φυτών και τις ηφαιστειακές εκρήξεις και απομακρύνεται με την φωτοσύνθεση από τα φυτά και τη διάλυσή του στους ωκεανούς και στο νερό γενικότερα. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες διαταράσσουν αυτό το ισοζύγιο και προκαλούν την υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή με καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον και τους ανθρώπους. (WWF Ελλάς)

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία μέσα από την οποία θερμαίνεται ο πλανήτης. Συγκεκριμένα η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται από την ατμόσφαιρα

και θερμαίνει τη γη. Η γη με τη σειρά της εκπέμπει θερμική ακτινοβολία προς το διάστημα με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Υπολογίζεται πως το 70% της ηλιακής ακτινοβολίας εκπέμπεται προς τα πίσω. Τα αέρια του θερμοκηπίου, δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οι υδρατμοί, το όζον, το μεθάνιο (CH₄) και οι χλωροφθοράνθρακες, παγιδεύουν την ακτινοβολία κοντά στην επιφάνεια του πλανήτη μας και αυξάνουν τη θερμοκρασία. Χωρίς το φαινόμενο του θερμοκηπίου η θερμοκρασία της γης θα ήταν περίπου -20 °C και όχι +15 °C που είναι τώρα επιτρέποντας το φαινόμενο της ζωής. Το πρόβλημα λοιπόν δεν είναι το ίδιο το φαινόμενο, αλλά η έξαρσή του (ανθρωπογενές φαινόμενο του θερμοκηπίου), που δημιουργείται από τη μεγάλη ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου που παράγει η ανθρώπινη δραστηριότητα λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων στη βιομηχανία στις μεταφορές κ.λ.π., λόγω της αποδάσωσης και λόγω της καταστροφής του φυτοπλαγκτόν των ωκεανών που φωτοσυνθέτει χρησιμοποιώντας CO₂ και αποτελώντας το βασικό απορροφητή του στη γή. (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Υπολογίζεται ότι από την εποχή της Βιομηχανικής Επανάστασης ως σήμερα η θερμοκρασία της γης έχει αυξηθεί κατά 0,5 °C, εξαιτίας της έξαρσης του φαινομένου του θερμοκηπίου και προβλέπεται ότι μέχρι το 2100, αν δε ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα, η θερμοκρασία θα αυξηθεί 1,4 °C - 5,8 °C. Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την αλλαγή του κλίματος, όσο μικρή κι αν φαίνεται, η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας οδηγεί στην κλιματική αλλαγή με καταστροφικές επιπτώσεις για τον πλανήτη και τους κατοίκους του. (WWF ΕΛΛΑΣ) Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι παρατεταμένοι καύσωνες, καταστροφικές καταιγίδες, αύξηση της στάθμης της θάλασσας, κίνδυνοι για τα ζώα, οξίνιση των ωκεανών, πυρκαγιές και ξηρασίες.

Η ναυτιλία σε όλο τον κόσμο παράγει και εκπέμπει συνολικά το 2,1% των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα. (IMO 2014, Σπύρου Κ. 2017) Πιο συγκεκριμένα, το 2012 ελευθερώθηκαν 977 εκατομμύρια τόνοι αυτών των αερίων, εκ των οποίων οι 962 ήταν διοξείδιο του άνθρακα, ενώ το 2018 ελευθερώθηκαν 1076 εκατομμύρια τόνοι (σημειώθηκε αύξηση 9,6%), εκ των οποίων οι 1056 ήταν διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) (σημειώθηκε αύξηση 9,3%). (IMO 2020)

Κεφάλαιο 1.3: Οξείδια του θείου- SO_x

Τα οξείδια του θείου αποτελούν πολύ σημαντικούς ρύπους για το περιβάλλον. Κύριο περιβαλλοντικό ζήτημα αποτελεί η οξίνιση του εδάφους και του αέρα, ενώ πρόβλημα προκαλείται και στην βιοποικιλότητα του οικοσυστήματος. Επίσης, είναι επικίνδυνα και για τον άνθρωπο, και κυρίως το διοξείδιο του θείου, SO₂, καθώς μπορεί να προκαλέσουν ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος, ενώ μια έκθεση δέκα μόνο λεπτών είναι ικανή να πλήξει τους πνεύμονες. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να προκληθούν καρκίνος του πνεύμονα, εγκεφαλικά, άσθμα και χρόνια αποφρακτική πνευμονοπάθεια. Ακόμα, έρευνα που διεξήχθη στη Φινλανδία

το 2016 έδειξε ότι, αν δεν μειωθεί το όριο SO_x που εκπέμπεται από τα πλοία από το 2020 και έπειτα, η ρύπανση που τα πλοία προκαλούν θα προκαλέσει περισσότερους από 570000 πρώιμους θανάτους παγκοσμίως την χρονική περίοδο 2020-2025 (IMO 2020, Σπύρου Κ. 2017)

Η συμμετοχή της ναυτιλίας στην παγκόσμια εκπομπή των οξειδίων αυτών είναι σημαντική. Έρευνα που έγινε το 2014, για την χρονική περίοδο 2007-2012, έδειξε πως στην περίοδο αυτή από τα πλοία παρήχθησαν, κατά μέσο όρο, 11,3 εκατομμύρια τόνοι SO_x ετησίως. Συνολικά η συμμετοχή της ναυτιλίας στην εκπομπή SO_x ανέρχεται στο 13% της παγκόσμιας εκπομπής. (IMO 2014)

Κεφάλαιο 1.4: Οξείδια του αζώτου- NO_x

Τα οξείδια του αζώτου έχουν ιδιαίτερη σημασία, αφού προκαλούν προβλήματα στο περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου. Προκαλούν τη δημιουργία της όξινης βροχής η οποία βλάπτει το περιβάλλον και καταστρέφει τα ανθρώπινα δημιουργήματα και τα μνημεία πολιτισμού. Παράλληλα, συντελώντας στη δημιουργία του όζοντος κοντά στην επιφάνεια της γης προκαλούν προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Ένα από τα αυτά τα οξείδια, το υποοξείδιο του αζώτου (N₂O) είναι από τα πλέον δραστικά και είναι 283 φορές πιο «δυνατό» από το CO₂ (Σπύρου Κ. 2017)

Η ναυτιλία φέρει μεγάλη ευθύνη για την εκπομπή αυτών των οξειδίων. Έρευνα που διεξήχθη το 2014, για την περίοδο 2007-2012, έδειξε πως το 15% της παγκόσμιας εκπομπής SO_x προέρχεται από τη ναυτιλία. Επιπρόσθετα, η ίδια έρευνα έδειξε πως, για την αναφερόμενη χρονική περίοδο, εκπέμφθηκαν από πλοία εν λειτουργία, κατά μέσο όρο, 20,9 εκατομμύρια τόνοι ετησίως. (IMO 2014)

Κεφάλαιο 1.5: Αιωρούμενα σωματίδια - PM

Με τον όρο Particulate matter (PM) ή Particle pollution, νοείται ένα μείγμα από στερεά σωματίδια και σταγονίδια που βρίσκεται στον αέρα. Μερικά σωματίδια, όπως η σκόνη και η καπνιά είναι αρκετά μεγάλα, ώστε να γίνονται ορατά δια γυμνού οφθαλμού, ενώ άλλα είναι τόσο μικρά που μπορούν να εντοπιστούν και να εξεταστούν μόνο με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Τα αιωρούμενα σωματίδια παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία μεγέθους και σχημάτων και συνίστανται από οργανικές και ανόργανες ουσίες μεταξύ των οποίων βρίσκονται ο ατομικός άνθρακας, η αιθάλη, η στάχτη, άκαυστο λιπαντικό έλαιο, υγρασία, θειικά και πολύ μικρά σωματίδια καυσίμου που κάηκε ατελώς ή δεν κάηκε. Τα σωματίδια αυτά εκπέμπονται από τις βιομηχανίες, τα αυτοκίνητα, τα power plants και τα πλοία. Το PM περιλαμβάνει δύο κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος και τη διευσδυτικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό:

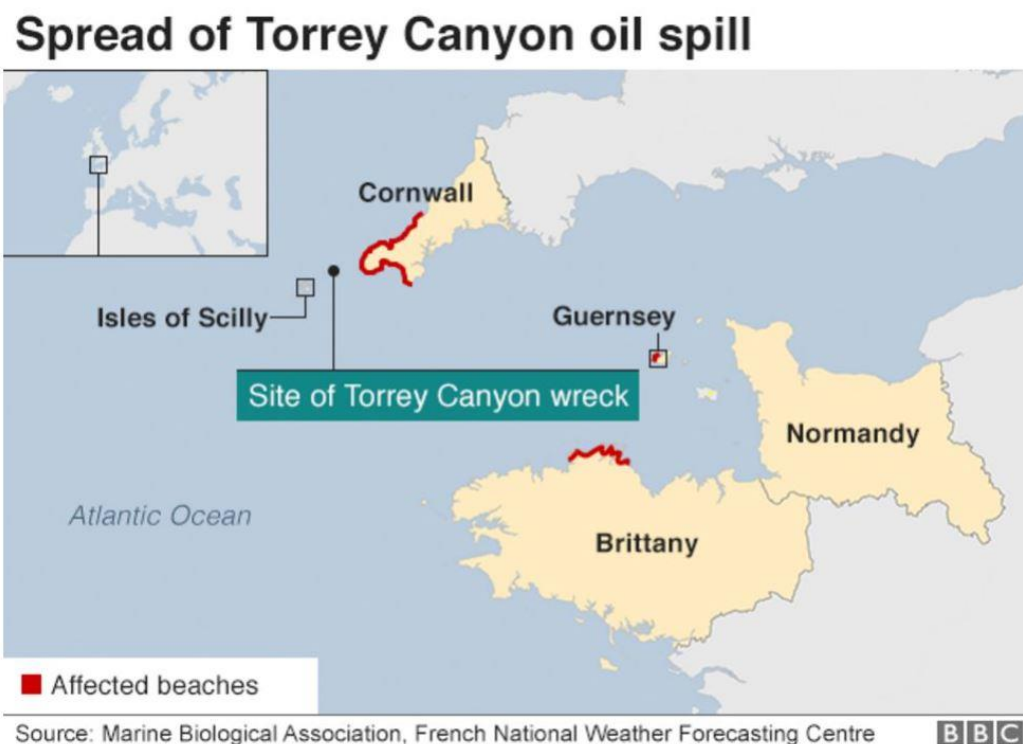
- PM10, το οποίο αποτελείται από εισπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο 10 μm και μικρότερη
- PM2,5, το οποίο αποτελείται από λεπτά εισπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο ίση και μικρότερη από 2,5 μm.

Το PM είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για την υγεία, επειδή τόσο τα μικροσωματίδια όσο και τα σταγονίδια λόγω του μεγέθους τους μπορούν να εισέλθουν στο ανθρώπινο σώμα δια της αναπνευστικής οδού και να προκαλέσουν προβλήματα υγείας. Τα αιωρούμενα σωματίδια που εκπέμπονται από πλοία ευθύνονται για 60.000 πρόωρους θανάτους κάθε χρόνο στη γη από καρκίνο του πνεύμονα και καρδιακά και αναπνευστικά προβλήματα. Οι ακτές της Ευρώπης, της Α. Ασίας και της Ν. Ασίας είναι οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο, επειδή είναι πυκνοκατοικημένες και παρουσιάζουν έντονη ναυτιλιακή δραστηριότητα. (Αγγελίδης 2019)

Κεφάλαιο 2: Μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος

Κεφάλαιο 2.1: Δημιουργία και ιστορική αναδρομή της δράσης της MARPOL

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα ξεκίνησε να υπάρχει προβληματισμός και ανησυχία στο χώρο της ναυτιλίας για τους κινδύνους που προκαλεί στην ανθρώπινη ζωή και υγεία και για την αρνητική επίδραση που είχε στο περιβάλλον. Αφορμή αυτής της ανησυχίας αποτέλεσε ένα μεγάλο ναυτικό ατύχημα και μια τεράστια περιβαλλοντική καταστροφή. Στις 18 Μαρτίου του 1967 το δεξαμενόπλοιο (tanker) «Torrey Canyon» άλλαξε τη διαδρομή του και, τελικά, προσέκρουσε σε ύφαλο ανάμεσα στο «Land's End» της νότιο-δυτικής Αγγλίας και στο σύμπλεγμα νησιών «Isles of Scilly».



Εικόνα 1: Τοποθεσία ατυχήματος «Torrey Canyon» και η εξάπλωση του πετρελαίου στις κοντινές ακτές (Bell B., Cacciottolo M. 2017)

Το ατύχημα αυτό είχε ως αποτέλεσμα να χυθεί στη θάλασσα όλο το αργό πετρέλαιο που μετέφερε το πλοίο, δημιουργώντας μια κηλίδα επιφάνειας 700 τετραγωνικών χιλιομέτρων (km²). Η περιβαλλοντική καταστροφή ήταν τόσο μεγάλη που πέθαναν περισσότερα από 15000 θαλασσοπούλια και μεγάλος αριθμός από είδη θαλάσσιων θηλαστικών και οργανισμών που ζούσαν στις κοντινές ακτές και μέσα στη θάλασσα, γεγονός που φαίνεται έκδηλα από τον χαρακτηρισμό «μαύρη παλίρροια». Σημάδι της τεράστιας καταστροφής αποτελεί, επίσης, το

γεγονός ότι 50 χρόνια μετά από το ατύχημα το πετρέλαιο δεν είχε καθαριστεί πλήρως. (Bell B., Cacciottolo M. 2017)



Εικόνα 2: Τα γεμάτα πετρέλαιο νερά του Guernsey το 2010 (Bell B., Cacciottolo M. 2017)

Έτσι, λοιπόν, στο συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών στη Στοκχόλμη της Σουηδίας τον Ιούνιο του 1973 άρχισαν συζητήσεις γύρω από το θέμα της προστασίας του περιβάλλοντος και της μείωσης της ρύπανσης από τη λειτουργία των πλοίων, ενώ στο συνέδριο της ίδιας χρονιάς στο Λονδίνο υπογράφηκε η σύμβαση για την αποτροπή της ρύπανσης που προκαλείται από τη ναυτιλία. Τελικά, στις 2 Νοεμβρίου του 1973 δημιουργήθηκε η MARPOL, η διεθνής σύμβαση για την πρόληψη για την μόλυνση του περιβάλλοντος από τα πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships). Η σύμβαση MARPOL αποτελεί το κύριο μέτρο προστασίας του περιβάλλοντος από ατυχήματα και από τη λειτουργία των πλοίων. (IMO)

Η σύμβαση MARPOL, λοιπόν, ψηφίστηκε το 1973, ωστόσο, τέθηκε σε ισχύ, σε μια αρχική μορφή ως πρωτόκολλο, το 1978. Έκτοτε, η σύμβαση MARPOL χωρίστηκε σε έξι παραρτήματα, τα οποία εντάχθηκαν σταδιακά με το πρώτο να τίθεται σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου του 1983. Αναλυτικότερα, τα έξι παραρτήματα της MARPOL είναι τα εξής:

- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΕΙΔΗ: τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου του 1983 και συμπεριλαμβάνει απαιτήσεις για τη λειτουργία, τη σχεδίαση την κατασκευή και τον εξοπλισμό των πλοίων. Το 1992 έγινε υποχρεωτικό, ενώ το 2001 και το 2003 αναθεωρήθηκε.

- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΕΠΙΒΛΑΒΕΙΣ ΥΓΡΕΣ ΟΥΣΙΕΣ ΣΕ ΧΥΔΗΝ ΜΟΡΦΗ: τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου του 1983 και είναι, επίσης, υποχρεωτικό. Σε αυτό το παράρτημα οι υγρές ουσίες κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με την επικινδυνότητά τους και θέτονται τα κριτήρια απόλυσής τους
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΕΠΙΒΛΑΒΕΙΣ ΥΓΡΕΣ ΟΥΣΙΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΔΙΑ ΘΑΛΑΣΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΚΕΥΑΣΜΕΝΕΣ ΜΟΡΦΕΣ Ή ΣΕ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΑ, ΦΟΡΗΤΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ Ή ΟΔΙΚΑ ΚΑΙ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ ΒΑΓΟΝΙΑ: τέθηκε σε ισχύ στην 1 Ιουλίου του 1992 και περιλαμβάνει γενικές απαιτήσεις σχετικά με τη συσκευασία, τις ετικέτες των πακέτων, τα πιστοποιητικά και τα υπόλοιπα απαιτούμενα έγγραφα, τον περιορισμό στον αριθμό των πακέτων κ.α.
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΛΥΜΑΤΑ ΠΛΟΙΩΝ: τέθηκε σε ισχύ στις 27 Σεπτεμβρίου του..... και απαγορεύει την απόρριψη των λυμάτων σε απόσταση 3 ναυτικών μιλίων από την κοντινότερη ακτή, εκτός αν το πλοίο έχει σε λειτουργία ειδική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, με τους περιορισμούς να γίνονται πιο χαλαροί σε απόσταση μεγαλύτερη των 3 ναυτικών μιλίων και ακόμα πιο χαλαροί σε απόσταση μεγαλύτερη των 12 ναυτικών μιλίων.
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ ΠΛΟΙΩΝ: τέθηκε σε ισχύ στις 31 Δεκεμβρίου του 1988, ενώ αναθεωρήθηκε το 2013, και περιλαμβάνει τα διάφορα είδη των απορριμμάτων και τις απαιτήσεις απόρριψής τους (απόσταση από την πλησιέστερη στεριά, τρόποι απόρριψης).
- ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ VI - ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΦΥΓΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΠΛΟΙΑ: τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου του 2005 και περιλαμβάνει όρια στις εκπομπές των οξειδίων του θείου και του αζώτου και των αιωρούμενων σωματιδίων, θέτει περιοχές περιορισμένων εκπομπών των παραπάνω ρύπων και, μετά την προσθήκη ενός νέου κεφαλαίου το 2011, παρουσιάζει λειτουργικά και τεχνικά ενεργειακά αποδοτικά μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Κεφάλαιο 2.2: Μέτρα και δράσεις υπέρ του περιβάλλοντος

Κεφάλαιο 2.2.1: Κανονισμοί και στόχοι σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος – περιοχές ελέγχου εκπομπών ECAs

Οι δράσεις για την προστασία του περιβάλλοντος δεν σταμάτησαν με την ολοκλήρωση και την εφαρμογή των παραρτημάτων της σύμβασης MARPOL. Οι αρμόδιοι οργανισμοί και οι αρμόδιες επιτροπές με συνέδρια και ομιλίες αλλά και με έρευνες και πειράματα, σε τακτά χρονικά διαστήματα, προσπαθούν να αντιστρέψουν τον αρνητικό ρόλο της ναυτιλίας στη ρύπανση της ατμόσφαιρας και της θάλασσας και να καταφέρουν να δημιουργήσουν μια ναυτιλία «πράσινη».

Έχουν προταθεί και έχουν υιοθετηθεί πάρα πολλοί κανονισμοί για την προστασία από τη ρύπανση. Ταυτόχρονα με τους κανονισμούς, θέτονται απτοί και μετρήσιμοι στόχοι, ώστε να ελέγχεται αν η «πορεία» είναι η σωστή, αν τα μέτρα και οι κανονισμοί είναι οι κατάλληλοι για να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, που είναι η σωτηρία του περιβάλλοντος. Είναι, συνεπώς, δύσκολη η καταγραφή όλων των κανονισμών και των στόχων. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, ωστόσο, είναι σημαντική η αναφορά των στόχων που έχουν τεθεί και αφορούν τα αέρια που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.

Ένας στόχος είναι να περιοριστούν οι εκπομπές των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 40% μέχρι το 2030, σε σχέση με το 2008, ενώ η μείωση αυτή πρέπει να φτάσει στο ποσοστό του 70% μέχρι το 2050. Ακόμα, υπάρχουν σκέψεις για να υπάρξουν πλεονεκτήματα και ανταμοιβή για όσους συμμορφώνονται με τους κανόνες, ενώ προβλέπονται ποινές και πρόστιμα για όσους τους αγνοούν. (MEPC 76/INF. 60)

Ακόμα, έγιναν πιο αυστηρά τα όρια που ισχύουν εντός των περιοχών ελέγχου εκπομπής (Emission Control Areas – ECAs). Οι περιοχές αυτές είναι θάλασσες μέσα στις οποίες τα ποσοστά % m/m (μάζα ανά μάζα) της εκπομπής οξειδίων αζώτου και θείου έχουν ένα ανώτατο όριο. Σκοπός της ύπαρξης αυτών των περιοχών είναι να καθαρίσει η ατμόσφαιρα από τα επιβλαβή αυτά οξείδια.

Μέσα στις περιοχές αυτές το ποσοστό εκπομπής οξειδίου του θείου SO_x από τα πλοία είναι μόλις 0,1 %, τη στιγμή που το ποσοστό εκπομπής παγκοσμίως φτάνει στο 3,5 %. Η σημαντική αυτή μείωση εξυπηρετεί την εκπλήρωση του στόχου που έχει τεθεί, δηλαδή το όριο εκπομπής SO_x σε παγκόσμια κλίμακα να περιοριστεί στο 0,5 % από το 2020 και εξής. Ταυτόχρονα, σημαντική είναι και η μείωση εκπομπής NO_x που, όπως φανερώνει και ο παρακάτω πίνακας, με τη χρήση των περιοχών ECAs το 2016. (Tier III) σχεδόν φτάνει στο 1/5 σε σύγκριση με το 2000: (IMO)

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh) n = engine's rated speed (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 January 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ e.g., 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 January 2016	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 2.4	2.0

Πίνακας 1: Εκπομπές NO_x ανάλογα με χρόνια και στροφές κύριας μηχανής (IMO)

Μέχρι αυτή τη στιγμή υπάρχουν τέσσερις περιοχές ελέγχου εκπομπών. Αυτές είναι η Βαλτική Θάλασσα (περιλαμβάνει και τον κόλπο της Φινλανδίας και τον κόλπο Μπόθνια), η

Βόρεια Θάλασσα, περιοχή της βόρειας Αμερικής (περιλαμβάνει τις ακτές του Ειρηνικού Ωκεανού των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής και του Καναδά) και η Καραϊβική των Ηνωμένων Πολιτειών (περιλαμβάνει τις περιοχές γύρω από το Πουέρτο Ρίκο και τις αμερικάνικες Παρθένες Νήσους). (ΙΜΟ) Ακολουθεί πίνακας στον οποίο φαίνεται πότε υιοθετήθηκαν και πότε τέθηκαν σε ισχύ οι παραπάνω περιοχές ως περιοχές ελέγχου εκπομπής για τους ρύπους SO_x και NO_x. (ΙΜΟ)

ECAs	ΡΥΠΟΣ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΟΥ ΥΙΟΘΕΤΗΘΗΚΕ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΟΥ ΤΕΘΗΚΕ ΣΕ ΙΣΧΥ
ΒΑΛΤΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΑ	SO _x	26 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 1997	19 ΜΑΪΟΥ 2006
	NO _x	7 ΙΟΥΛΙΟΥ 2017	1 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2021
ΒΟΡΕΙΑ ΘΑΛΑΣΣΑ	SO _x	22 ΙΟΥΛΙΟΥ 2005	22 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2007
	NO _x	7 ΙΟΥΛΙΟΥ 2017	1 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2021
ΒΟΡΕΙΑΣ ΑΜΕΡΙΚΗΣ	SO _x	26 ΜΑΡΤΙΟΥ 2010	1 ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2012
	NO _x	26 ΜΑΡΤΙΟΥ 2010	1 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2016
ΚΑΡΑΪΒΙΚΗ ΗΝΩΜΕΝΩΝ ΠΟΛΙΤΕΙΩΝ	SO _x	26 ΙΟΥΛΙΟΥ 2011	1 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2014
	NO _x	26 ΙΟΥΛΙΟΥ 2011	1 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2016

Πίνακας 2: Ημερομηνίες υιοθέτησης περιοχών ελέγχου εκπομπών (ΙΜΟ)

Σημαντικό κεφάλαιο, όσον αφορά τις περιοχές ελέγχου εκπομπών, αποτελεί η Μεσόγειος Θάλασσα. Η θάλασσα αυτή είναι μία από τις πιο σημαντικές στον πλανήτη, λόγω της γεωγραφικής της θέσης. Ενώνει την Ευρώπη και την Ασία μέσω της διώρυγας του Σουέζ και των στενών του Βοσπόρου και του Ελλήσποντου και περιλαμβάνει πολλούς και σημαντικούς εμπορικούς δρόμους. Ακόμα, αποτελεί τη δεύτερη σε σειρά, μετά από την Καραϊβική, θάλασσα με τις περισσότερες κρουαζιέρες (το 2017 ταξίδεψαν στα νερά της το 15,8% των κρουαζιεροπλοίων παγκοσμίως) και φιλοξενεί κάθε χρόνο 120000 επιβάτες, ενώ στα λιμάνια της συμπεριλαμβάνονται 36 από τα μεγαλύτερα λιμάνια του κόσμου, όπως αυτό του Πειραιά και της Βαλένθια, μέσω των οποίων διακινείται ένας τεράστιος όγκος εμπορευμάτων. (REMPEC)

Ωστόσο, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η μεγάλη κίνηση των πλοίων οδηγεί και σε μεγάλη ρύπανση του περιβάλλοντος. Σύμφωνα με έρευνα που έγινε από την REMPEC (Regional Marine Pollution Emergency Response Center), εκτιμήθηκε πως το 2016 η εκπομπή οξειδίου του θείου ήταν τουλάχιστον 681000 MT και προβλεπόταν να αυξηθεί περισσότερο στα επόμενα έτη. Έτσι, λοιπόν, στο συνέδριο «MAP Focal Points» που διεξήχθη στις 2-5 Δεκεμβρίου του 2019 εγκρίθηκε η πρόταση να οριστεί η Μεσόγειος Θάλασσα ως περιοχή ελέγχου εκπομπών και αποφασίστηκε να τεθεί σε ισχύ πριν από τον Μάρτιο του 2024 (REMPEC)

Κεφάλαιο 2.2.2: EEDI – Energy Efficiency Design Index

Ο EEDI είναι το πιο σημαντικό εργαλείο που μετράει το πόσο ενεργειακά αποδοτικό είναι ένα πλοίο. Αφορά τον σχεδιασμό, τον εξοπλισμό και τις μηχανές του πλοίου και βοηθάει στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τη ναυτιλία. Είναι ένας δείκτης ο οποίος εκφράζεται σε γραμμάρια CO₂ ανά μονάδα μεταφορικής ικανότητας και απόστασης:

$$EEDI = CO_2 \text{ emission} / \text{Transport Work όπου,}$$

- CO₂ emission: οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα του πλοίου
- Transport Work = Capacity x Reference Speed: το παραγόμενο έργο, όπου:
Capacity: η χωρητικότητα του πλοίου
Reference Speed: η ταχύτητα του πλοίου σε ισχύ ίση με το 75% της μέγιστης συνεχόμενης ισχύος MCR

Έχει ένα ανώτατο όριο για κάθε τύπο και μέγεθος πλοίου, ανάλογα και τη χρονική περίοδο για την οποία γίνεται η μελέτη, το οποίο όριο ελαττώνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (φάσεις).

$$\text{Attained EEDI} \leq \text{Required EEDI} = (1-X/100) \times \text{Reference} , \text{ όπου:}$$

- X: παράγοντας μείωσης ανάλογα με τη φάση
- Reference = $a \times b^{-c}$: τιμή αναφοράς του δείκτη EEDI ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, όπου: a, b και c οι σταθερές που αντιστοιχούν σε τύπο πλοίου. Οι τιμές των σταθερών αυτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ship type defined in regulation 2	a	b	c
2.25 Bulk carrier	961.79	DWT of the ship	0.477
2.26 Gas carrier	1120.00	DWT of the ship	0.456
2.27 Tanker	1218.80	DWT of the ship	0.488
2.28 Container ship	174.22	DWT of the ship	0.201
2.29 General cargo ship	107.48	DWT of the ship	0.216
2.30 Refrigerated cargo carrier	227.01	DWT of the ship	0.244
2.31 Combination carrier	1219.00	DWT of the ship	0.488

Πίνακας 3: Τιμές των παραμέτρων της τιμής αναφοράς του EEDI ανάλογα με τον τύπο του πλοίου (IMO)

Υπάρχουν τέσσερις φάσεις: 0 (1 Ιανουαρίου 2013 – 31 Δεκεμβρίου 2014), 1 (1 Ιανουαρίου 2015 – 31 Δεκεμβρίου 2019), 2 (1 Ιανουαρίου 2020 - 1 Δεκεμβρίου 2024), 3 (1 Ιανουαρίου 2025 και εξής). Για πλοία που κατασκευάστηκαν την χρονική περίοδο μεταξύ του 2000 και του 2010, κατά την πρώτη φάση το ποσοστό μείωσης του CO₂ είναι 10%, ενώ στην τρίτη φάση ανέρχεται στο 30%.

Ship Type	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
Bulk carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Gas carrier	10,000 DWT and above	0	10	20	30
	2,000 – 10,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Tanker	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Container ship	15,000 DWT and above	0	10	20	30
	10,000 – 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
General Cargo ships	15,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000 – 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Refrigerated cargo carrier	5,000 DWT and above	0	10	15	30
	3,000 – 5,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*	0-30*
Combination carrier	20,000 DWT and above	0	10	20	30
	4,000 – 20,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*	0-30*

Πίνακας 4: Φάσεις του δείκτη EEDI (IMO)

Το 2014 έγιναν προσθήκες κανονισμών για πλοία τύπου LNG, Cruise passenger και Ro-Ro, δηλαδή για εκείνους τους τύπους των πλοίων που ευθύνονται για το 85% του CO₂ που παράγει ο παγκόσμιος στόλος.

Ο EEDI προστατεύει το περιβάλλον θέτοντας όρια σχετικά με τις εκπομπές CO₂, αλλά συγχρόνως επιτρέπει στις πλοιοκτήτριες εταιρείες να επιλέξουν τον τρόπο με τον οποίο θα εφαρμόσουν τους κανονισμούς και θα τηρήσουν τα όρια που έχουν τεθεί. Οι εταιρείες δηλαδή έχουν την ελευθερία, να επιλέξουν τη στρατηγική για τις επενδύσεις που θα κάνουν σε νέες τεχνολογίες και νέους σχεδιασμούς, έτσι ώστε το CO₂ που εκπέμπουν τα πλοία τους να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων.

Ο EEDI, ωστόσο, σύμφωνα με έρευνες, υπερεκτιμά τη μείωση των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς τα πλοία συνήθως λειτουργούν σε ισχύ μεγαλύτερη από το 75% του MCR. (MEPC 2011)

Κεφάλαιο 2.2.3: EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index

Ο EEXI είναι ένας δείκτης παρόμοιος με τον EEDI αλλά, σε αντίθεση με τον τελευταίο, που απευθύνεται σε καινούργια, νεόκτιστα πλοία, αφορά πλοία που ήδη υπάρχουν και είναι σε λειτουργία. Είναι εφαρμόσιμος για τα περισσότερα πλοία με ολικό, μεικτό βάρος (Gross Tonnage) μεγαλύτερο των 400 τόνων και τα οποία ταξιδεύουν σε όλον τον κόσμο. Ο EEXI υιοθετήθηκε από τον IMO στις 17 Ιουλίου 2011 και αποφασίστηκε να τεθεί σε ισχύ από την 1^η Νοεμβρίου του 2022. Στόχος αυτού του δείκτη είναι να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη μείωση στις εκπομπές των αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. (Lloyd's Register)

Η ομοιότητα μεταξύ των δύο δεικτών φαίνεται και από το γεγονός ότι ο υπολογισμός του EEXI γίνεται με την χρήση του τύπου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του EEDI. Επιπρόσθετα, αν ένα πλοίο συμμορφώνεται με τη δεύτερη και την τρίτη φάση του δείκτη EEDI, αυτό αρκεί ώστε να μην απαιτείται ο υπολογισμός και του δείκτη EEXI. (DNV)

Κεφάλαιο 2.2.4: CII – Carbon Intensity Indicator

Ο CII είναι ένας νέος δείκτης που σχετίζεται με τις εκπομπές άνθρακα ενός πλοίου και τον τύπο του πλοίου αυτού και ο οποίος βοηθάει στο να χαρακτηριστεί, ή όχι, το πλοίο αυτό ως ενεργειακά αποδοτικό. Πιο αναλυτικά, καθορίζεται μία τιμή - όριο του δείκτη η οποία είναι αντιπροσωπευτική για κάθε τύπο πλοίου και, αφού γίνει ο υπολογισμός του δείκτη για το εκάστοτε πλοίο, συμπεραίνεται αν το πλοίο είναι εντός ορίου ή αν θα πρέπει να συμμορφωθεί. Έτσι, το κάθε πλοίο θα αποκτά τις «ταυτότητες» “A”, “B”, “C”, “D” και “E” που

δείχνουν την κλιμάκωση από την «πολύ καλή ποιότητα» στη «μέτρια ποιότητα» και, τελικά, στην «πολύ κακή ποιότητα» (“major superior”, “minor superior”, “moderate”, “minor inferior”, “major inferior”). Τα πλοία με «ταυτότητες» “A”, “B” και “C” θεωρούνται εντός ορίων και ενεργειακά αποδοτικά, ενώ τα πλοία με «ταυτότητες» “D” για τρία συνεχόμενα χρόνια και “E” θεωρούνται ότι δε συμμορφώνονται. Αυτά, λοιπόν, τα μη ενεργειακά αποδοτικά πλοία θα πρέπει να υποβάλουν ένα πλάνο που θα δείχνει τις παρεμβάσεις που θα γίνουν ώστε να διορθωθεί το ζήτημα. (MEPC.339(76))

Ο δείκτης CII υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\text{Attained CII} = M / W$$

όπου:

- $M = F_{Cj} \times C_{Fj}$, η συνολική μάζα του CO₂ που καταναλώνεται, όπου:
j: το είδος του καυσίμου
F_{Cj}: η συνολική μάζα καυσίμου j που καταναλώθηκε
C_{Fj}: ο συντελεστής μετατροπής μάζας καυσίμου σε μάζα CO₂
- $W = C \times D_t$, το παραγόμενο έργο, όπου:
C: η χωρητικότητα του πλοίου (για πλοία τύπου Bulk carrier, Tanker, Container ships, Gas carrier, LNG, Ro-Ro cargo ships, Refrigerated cargo carrier και Combination carrier το C θεωρείται ίσο με τη μεταφορική ικανότητα DWT, ενώ για πλοία τύπου Cruise passenger ships, Ro-Ro cargo ships/ vehicle carriers και Ro-Ro passenger ships το C θεωρείται ίσο με το ολικό βάρος GT)
D_t: η συνολική απόσταση που έχει διανύσει το πλοίο μετρημένη σε ναυτικά μίλια

(MEPC.336(76))

Γενικά, όπως προαναφέρθηκε, πρέπει η τιμή του δείκτη CII ενός πλοίου να μην ξεπερνάει μία συγκεκριμένη τιμή που σχετίζεται με τον τύπο του πλοίου. Δηλαδή πρέπει να ισχύει:

$$\text{Attained CII} \leq \text{Required annual operational CII}$$

Η τιμή – όριο του δείκτη CII υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\text{Required annual operational CII} = (1 - Z/100) \times \text{CII}_{\text{REF}}$$

όπου:

Z: ο παράγοντας μείωσης ανάλογα με το έτος. Οι τιμές του Z φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (για τα έτη 2027 έως 2030 δεν έχει υπολογιστεί ακόμα – οι τιμές προβλέπονται να

είναι πιο μεγάλες αλλά θα υπολογιστούν αφού παρατηρηθούν τα αποτελέσματα των προηγούμενων χρόνων) (MEPC.338(76))

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

Πίνακας 5: Τιμές του παράγοντα μείωσης Z ανάλογα με το έτος (MEPC.338(76))

- $CII_{REF} = a \times Capacity^c$: τιμή αναφοράς του δείκτη CII ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, όπου a και c οι σταθερές που αντιστοιχούν σε τύπο και μέγεθος πλοίου

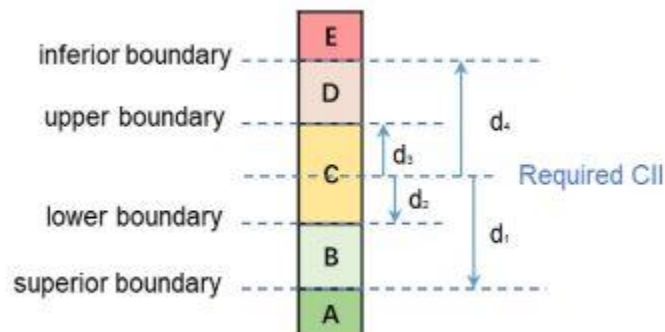
(MEPC.337(76))

Ακολουθεί πίνακας που παραθέτονται οι παράμετροι που καθορίζουν τον δείκτη αναφοράς:

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	40853	0.812
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	14479E10	2.673
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)		GT	5739	0.631
Ro-ro cargo ship		DWT	10952	0.637
Ro-ro passenger ship		GT	7540	0.587
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

Πίνακας 6: Παράμετροι ανάλογα με τον τύπο και το έγεθος του πλοίου που καθορίζουν το δείκτη αναφοράς CI_{REF} (MEPC.337(76))

Επιπλέον, έχουν υπολογιστεί κάποια διανύσματα “dd”, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου, τα οποία βοηθούν στο να τεθούν τα όρια που υποδεικνύουν την κατηγορία “A”, “B”, “C”, “D” και “E” στην οποία ανήκει το πλοίο. Συγκεκριμένα το d1 δείχνει το όριο μεταξύ των κατηγοριών “A” και “B”, το d2 δείχνει το όριο μεταξύ των κατηγοριών “B” και “C”, το d3 μεταξύ των κατηγοριών “C” και “D” και το d4 μεταξύ των κατηγοριών “D” και “E”. (MEPC.339(76))



Διάγραμμα 1: Σύνδεση μεταξύ διανυσμάτων dd και κατηγοριών A-E (MEPC.339(76))

Τα όρια των κατηγοριών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

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		DWT	0.66	0.90	1.11	1.37
Ro-ro passenger ship		GT	0.72	0.90	1.12	1.41
Cruise passenger ship		GT	0.87	0.95	1.06	1.16

Πίνακας 7: Τιμές των ορίων μεταξύ των κατηγοριών A-E (MEPC.339(76))

Τελικά, υπολογίζεται ο λόγος Attained CII / Required CII και το αποτέλεσμα καθορίζει την κατηγορία στην οποία θα ανήκει το υπό μελέτη πλοίο.

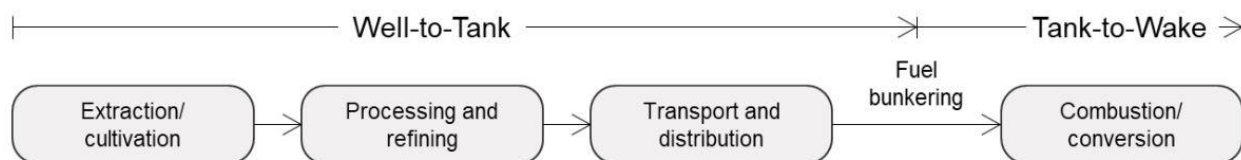
Όσον αφορά τη ναυτιλία στο σύνολό της παγκοσμίως, η μείωση της έντασης του άνθρακα, για μια χρονιά “γ” ως προς μια χρονιά “γ_{REF}” που λαμβάνεται ως αναφορά, προκύπτει σύμφωνα με τον τύπο:

$$R_{\text{shipping},\gamma} = 100\% \times (\text{Attained CII}_{\text{shipping},\gamma} - \text{Attained CII}_{\text{shipping},\gamma_{\text{REF}}}) / \text{Attained CII}_{\text{shipping},\gamma_{\text{REF}}}$$

(MEPC.338(76))

Κεφάλαιο 2.2.5: FFL - Fuel Lifecycle Label

Προκειμένου να καταπολεμηθεί η περιβαλλοντική καταστροφή λόγω ρύπανσης από τη χρήση ρυπογόνων καυσίμων αποφασίστηκε να μην μελετάται η επίδραση κάθε καυσίμου στο περιβάλλον μόνο κατά την καύση του. Έχει αποδειχθεί ότι τα καύσιμα ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα και πριν από τη χρήση τους. Έτσι, αποφασίστηκε οι υπολογισμοί των ρύπων να αφορούν ολόκληρη τη «ζωή» του κάθε καυσίμου. Πιο, συγκεκριμένα, οι υπολογισμοί αφορούν δύο φάσεις, την Well-to-Tank και την Tank-to-Wake. Η Well-to-Tank (WtT) φάση αναφέρεται στους ρύπους που εκπέμπονται κατά τις διαδικασίες παραγωγής και εξόρυξης, επεξεργασίας και διύλισης και μεταφοράς και διανομής του καυσίμου στα σημεία όπου θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή στα πλοία. Η Tank-to-Wake (TtW) φάση αναφέρεται στους ρύπους που εκπέμπονται κατά την καύση του καυσίμου ή τη μετατροπή της ενέργειας σε άλλη μορφή, συμπεριλαμβανομένης και της ποσότητας ενέργειας που «χάνεται» κατά τις διαδικασίες αυτές. Στην περίπτωση που η διαρροή είναι μηδενική, τότε η φάση αυτή λέγεται και Tank-to-Propeller (WtP). Αθροιστικά, οι φάσεις Well-to-Tank και Tank-to-Wake αποτελούν τη φάση Well-to-Wake (WtW). (IMO 2021)



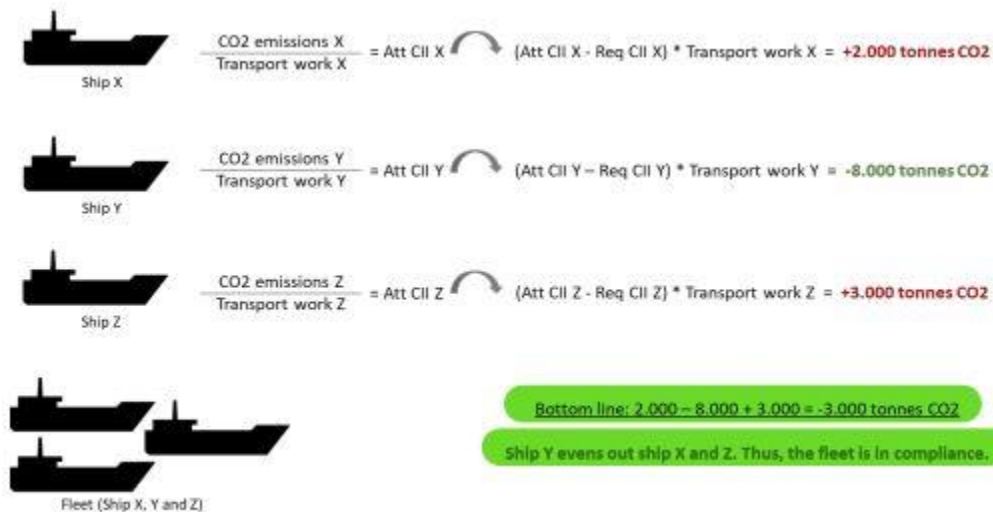
Διάγραμμα 2: Διαδικασία Well-to-Wake (IMO)

Κεφάλαιο 2.2.6: FLM - Fleet Level Monitoring

Μία πρόταση που εξετάζεται από τις αρμόδιες επιτροπές, στον έλεγχο γύρω από την ενεργειακή απόδοση και από τον δείκτη CII, είναι να σταματήσει να εστιάζεται η προσοχή μεμονωμένα σε κάθε πλοίο, αλλά να μελετάται και να ελέγχεται ολόκληρος ο στόλος στον οποίο ανήκουν τα εκάστοτε πλοία. Πιο συγκεκριμένα, οι δοκιμές και οι έλεγχοι στα πλοία να συνεχίζουν να γίνονται και το κάθε πλοίο να κατατάσσεται στην αντίστοιχη κατηγορία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ωστόσο, μια εταιρία που κατέχει και διαχειρίζεται πλοία δεν κρίνεται, ως προς την προστασία του περιβάλλοντος και την ενεργειακή απόδοση, από κάθε πλοίο της ξεχωριστά, αλλά από τον στόλο ή τους στόλους στους οποίους ανήκει αυτό το πλοίο. Σημειώνεται ότι ένας στόλος αποτελείται από πλοία τα οποία κατέχει ο ίδιος ιδιοκτήτης, βρίσκονται υπό την ίδια σημαία και ανήκουν στον ίδιο τύπο πλοίου.

Το συγκεκριμένο μέτρο, αυτό καθαυτό, δεν θα έχει κάποια επίδραση στην ενεργειακή απόδοση των πλοίων και του στόλου. Προσφέρει όμως πολύτιμα πλεονεκτήματα στους πλοιοκτήτες, με την αξιοποίηση των οποίων θα επιτευχθούν ευκολότερα οι στόχοι που έχουν τεθεί για το 2030 και το 2050. Η συμμόρφωση σε επίπεδα στόλου θα δώσει την ελευθερία και την ευελιξία στους διαχειριστές των πλοίων να επενδύσουν, με τον τρόπο και στο βαθμό που εκείνοι επιθυμούν, πάνω στα πλοία τους. Αντί να υποχρεώνονται να διαθέσουν χρόνο και χρήματα για την ενεργειακή βελτίωση κάθε πλοίου που χρειάζεται να «ανέβει» κατηγορία (για παράδειγμα από “C” σε “B”), θα επενδύουν μόνο στα πλοία που εκείνοι επιθυμούν χωρίς καμία επίπτωση, αφού πλέον σημασία δε θα έχει η βελτίωση του κάθε πλοίου, αλλά του στόλου συνολικά. Με αυτόν τον τρόπο, οι πλοιοκτήτες θα εξοικονομούν χρήματα από κάποια πλοία, τα οποία θα τα διαθέτουν σε άλλα πλοία. Έτσι, θα έχουν τη δυνατότητα, και το κίνητρο, να χρησιμοποιήσουν στα πλοία τους «πράσινα» εναλλακτικά καύσιμα με μηδενικές εκπομπές CO₂ ή να προβούν σε καινοτόμες εφαρμογές που, αυτή τη στιγμή είναι δύσκολο να υλοποιηθούν λόγω του υψηλού κόστους τους. (MEPC 76/INF.60)

Ακολουθούν δύο παραδείγματα που δείχνουν τον τρόπο που θα αξιολογούνται οι στόλοι:



Εικόνα 3: Παράδειγμα συμμόρφωσης σε επίπεδο στόλου (MEPC 76/7/30)

Ship #	DWT	Days	CII target	CO ₂	CII actual	Diff (tons)	% CO ₂ of CII target	Rating
1	50,000	365	6	23,000	6.05	191.7	101%	C
2	100,000	365	4	30,000	3.80	-1,500.0	95%	B
3	100,000	365	4	33,000	3.95	-412.5	99%	C
4	75,000	365	3.5	28,000	3.45	-400.0	99%	C
5	75,000	365	3.5	25,000	3.30	-1,428.6	94%	B
6	150,000	365	3	40,000	3.20	2,666.7	107%	E
7	50,000	365	6	23,000	0.05	-22,808.3	1%	A
Total				2E+05		-23,691.1	0.9	A

Πίνακας 8: Παράδειγμα συμμόρφωσης σε επίπεδο στόλου (MEPC 76/7/30)

Παρατηρείται ότι και στα δύο παραδείγματα υπάρχουν πλοία τα οποία δε συμμορφώνονται με τους κανονισμούς (στο πρώτο παράδειγμα δε συμμορφώνονται τα δύο από τα τρία πλοία και στο δεύτερο παράδειγμα υπάρχει πλοίο που ανήκει στην κατηγορία “Ε”). Ωστόσο, επειδή στους στόλους υπάρχουν πλοία με πολύ καλή ενεργειακή απόδοση, όχι απλά εξισορροπών την κατάσταση και θέτουν τους στόλους εντός ορίων, αλλά επιφέρουν και καλύτερα αποτελέσματα (στο δεύτερο παράδειγμα το πλοίο που ανήκει στην κατηγορία “Α” και αυτά της “Β” κατηγορίας «οδηγούν» όλο το στόλο κατατάσσοντας τον στην κατηγορία “Α”). (MEPC 76/7/30)

Κεφάλαιο 2.2.7: Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία ενός πλοίου. Υπάρχουν πολλές ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις οι οποίες είναι σημαντικές. Κάποιες από αυτές είναι «ζωτικής σημασίας», καθώς χωρίς αυτές δε είναι δυνατή η λειτουργία του πλοίου, ενώ κάποιες άλλες έχουν βοηθητικό ρόλο, ώστε να γίνονται κάποιες εργασίες με μεγαλύτερη ασφάλεια, με περισσότερη ευκολία, πιο σύντομα και λιγότερο δαπανηρά.

Τα ηλεκτρολογικά συστήματα του πλοίου είναι αρκετά και, σε επόμενο κεφάλαιο, θα αναλυθούν κάποια από αυτά, που βοηθούν στην ενεργειακή βελτίωση του πλοίου, εξετάζοντας τις διατάξεις τους, τον τρόπο λειτουργίας τους, τα αποτελέσματα που επιφέρουν, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς, και τα κόστη των επενδύσεών τους.

Κεφάλαιο 2.2.8: Alternative – low carbon fuels

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυτιλία, με τις ουσίες που περιέχουν και τους ρύπους που παράγουν μετά την καύση τους, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στη ρύπανση της ατμόσφαιρας, η οποία ολοένα και αυξάνεται. Έτσι, η προσοχή των αρμόδιων έχει στραφεί στην εύρεση εναλλακτικών καυσίμων που μπορούν να αντικαταστήσουν το πετρέλαιο. Ταυτόχρονα, οι αρχές σταδιακά αυξάνουν τον φόρο που έχει τεθεί στο πετρέλαιο για κάθε τόνο CO₂ που παράγει κατά την καύση του, έτσι ώστε να να επισπευθεί η μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα. Καύσιμα όπως το υδρογόνο, η αμμωνία, η μεθανόλη κ.α. αποτελούν κάποιες λύσεις που μπορούν να οδηγήσουν στην επίτευξη του απώτερου στόχου, στη δημιουργία μιας «πράσινης» ναυτιλίας.

Η ευρεία χρήση, ωστόσο, αυτών των εναλλακτικών δεν είναι ακόμα εύκολο να επιτευχθεί, λόγω, κυρίως, τριών προβλημάτων. Αρχικά, έχουν υψηλό κόστος απόκτησης. Ακόμα, υψηλό είναι και το κόστος της επένδυσης (CAPEX – CAPital EXpenditure), που είναι απαραίτητη να γίνει, για την εγκατάσταση κατάλληλων δεξαμενών και συστημάτων εντός των πλοίων. Επιπλέον, υπάρχει πρόβλημα στην παραγωγή των καυσίμων αυτών αλλά και στον ανεφοδιασμό των πλοίων, καθώς δεν έχουν τοποθετηθεί στα περισσότερα λιμάνια κατάλληλα συστήματα ανεφοδιασμού. Σύμφωνα με έρευνα που έγινε το 2020, για την επίτευξη των στόχων που έχει θέσει ο IMO για το 2050 απαιτούνται 1,4 τρισεκατομμύρια αμερικάνικα δολάρια. Το 87% από αυτά χρειάζονται για επενδύσεις σε εγκαταστάσεις στη στεριά για την παραγωγή των καυσίμων και τον ανεφοδιασμό. (Haskell H. 2021)

Τα εναλλακτικά καύσιμα αποτελούν σημαντικό μέρος αυτής της εργασίας και αναλύονται εκτενέστερα στο 2^ο μέρος.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Κεφάλαιο 1: Η εργασία / πρότζεκτ

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παρούσας εργασίας, η εργασία ξεφεύγει από τα πλαίσια μιας συνηθισμένης διπλωματικής εργασίας αλλά αποτελεί ένα πραγματικό πρότζεκτ σε συνεργασία με την εταιρία Lloyd's Register. Ο Lloyd's Register είναι νηογνώμονας, ιδρύθηκε το 1970 και, έκτοτε, για 260 χρόνια είναι ο πρώτος νηογνώμονας με πελάτες σε 182 χώρες παγκοσμίως.

Το θέμα του πρότζεκτ είναι η επίδραση των εναλλακτικών καυσίμων στην επίδοση πλοίων. Μελετώνται, δηλαδή, διάφορα σενάρια εναλλακτικών καυσίμων τόσο από περιβαλλοντικής όσο και οικονομικής σκοπιάς με χρήση του νεοσύστατου κανονισμού «Fuel EU Maritime».

Ο στόλος ο οποίος εξετάζεται αποτελείται από πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, δηλαδή Bulk Carriers, 45 στον αριθμό και διαφόρων μεγεθών. Πρόκειται για πλοία που ανήκουν στις κατηγορίες Panamax (με DWT μικρότερο των 80000 τόνων), Kamsarmax (με DWT μεταξύ των 80000 και των 85000 τόνων), Post-Panamax (με DWT μεταξύ των 85000 και των 110000 τόνων) και Capesize (με DWT μεταξύ των 110000 και των 200000 τόνων).

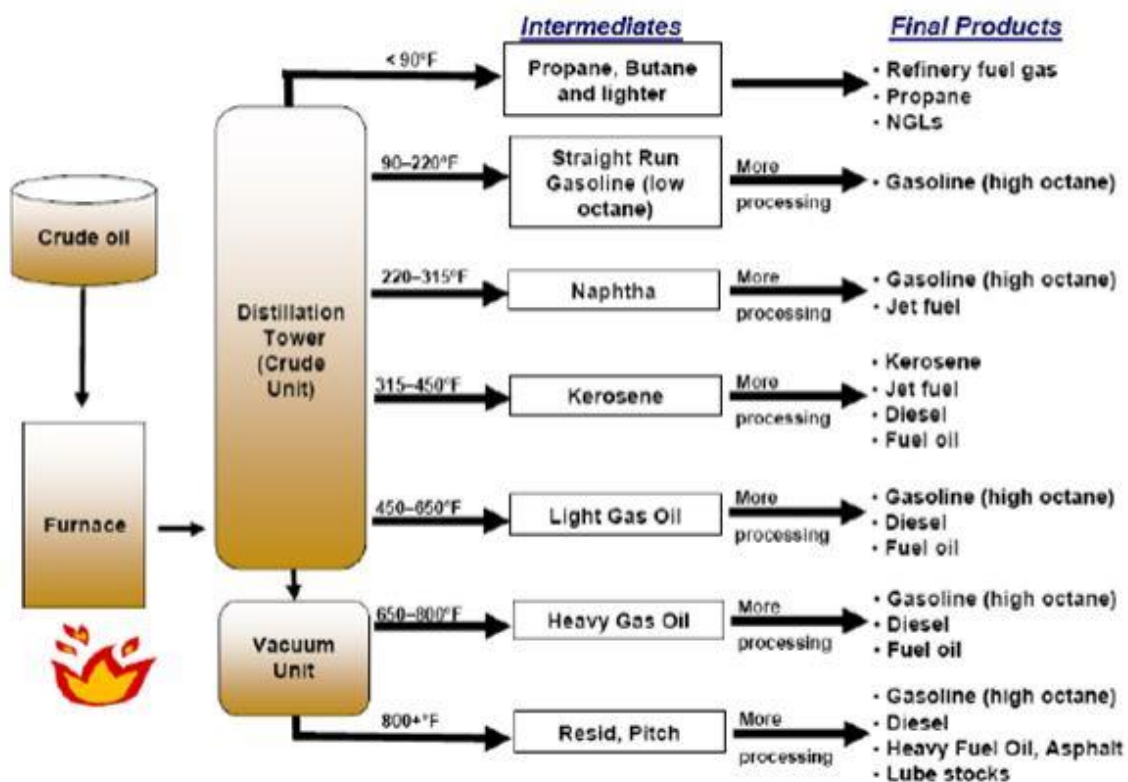
Τα υπό εξέταση σενάρια είναι:

- Μηχανές με καύσιμο Ντίζελ
- Μηχανές με καύσιμο LNG
- Μηχανές με καύσιμο Υδρογόνο
- Μηχανές με καύσιμο Αμμωνία
- Μηχανές με καύσιμο Μεθανόλη
- Μηχανές με καύσιμο Βιο-Ντίζελ
- Χρήση τεχνολογίας Cold Ironing κατά τον ελλιμενισμό

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

Κεφάλαιο 2.1: Συμβατικά καύσιμα ναυτιλίας

Στη ναυτιλία συνήθως χρησιμοποιούνται βαριά υπολειμματικά καύσιμα (residual oil) και ελαφριά αποστάγματα αργού πετρελαίου (marine gas oil MGO, marine diesel oil MDO). Η ποιότητά τους ποικίλει και εξαρτάται από το ίδιο το αργό πετρέλαιο και τη διύλιση του. Παράγοντες, όπως η προέλευση του πετρελαίου, ο τρόπος και ο βαθμός διύλισης, η ανάμιξη με ελαφρύτερα προϊόντα και ο τρόπος με τον οποίο αποθηκεύονται και μεταφέρονται, παίζουν σημαντικό ρόλο στην ύπαρξη των διαφορετικών ποιοτήτων των καυσίμων. Έτσι, επηρεάζονται και οι ιδιότητες τους, όπως για παράδειγμα το ιξώδες, δηλαδή η αντίσταση που προβάλλει ένα ρευστό κατά τη ροή του, η πυκνότητα, το σημείο ανάφλεξης, η περιεκτικότητα σε θείο, η περιεκτικότητα σε νερό, η περιεκτικότητα σε τέφρα και άλλες. Γενικά, τα ναυτιλιακά καύσιμα κατατάσσονται σε κατηγορίες Intermediate Fuel Oil (IFO), με κριτήριο το ιξώδες στους 50 °C. (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)



Διάγραμμα 3: Παραγωγή διαφορετικών καυσίμων από τη διύλιση αργού πετρελαίου (Ραπτοτάσιος Σ. 2018)

Οι ναυτικοί κινητήρες diesel συνήθως μπορούν να λειτουργήσουν καταναλώνοντας διαφορετικές ποιότητες καυσίμου. Ωστόσο, η κατασκευάστρια εταιρία δίνει οδηγίες για το καύσιμο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί και την ποιότητά του, έτσι ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση, η καλύτερη δυνατή κατανάλωση και, τελικά, η καλύτερη δυνατή οικονομία.

Στα διυλιστήρια, όμως, και στις εταιρίες που εμπορεύονται πετρελαιοειδή δε συμφέρει να διαθέτουν αποθήκες για όλα τα είδη καυσίμων που είναι κατάλληλα για τους ναυτικούς κινητήρες. Για αυτό υπάρχουν μόνο τρία βασικά προϊόντα, MDO, IFO 180 και IFO 380, και οι διαφορετικοί τύποι ναυτιλιακών καυσίμων προκύπτουν από τη σωστή ανάμιξη αυτών, ώστε να διασφαλίζεται το εκάστοτε επιθυμητό ιξώδες. (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)

Οι προδιαγραφές ναυτιλιακών καυσίμων διεθνώς έχουν τεθεί από τον International Standards Organization (ISO). Ο σκοπός αυτών των προδιαγραφών είναι διττός: να διασφαλιστεί η παροχή καυσίμων που διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ποιότητας και που θα είναι άμεσα διαθέσιμα στα λιμάνια όλου του κόσμου, σε επαρκή ποσότητα και σε λογικό κόστος και να τεθούν τα ανώτατα όρια στην περιεκτικότητα ανεπιθύμητων ουσιών και τα κατώτατα όρια στις ιδιότητες που συντελούν στην καλή λειτουργία του κινητήρα. Το διεθνές πρότυπο είναι το ISO 8217 και αφορά 15 ποιότητες καυσίμων διαφορετικές μεταξύ τους:

- Marine Gas Oil (DMX)
- Marine Diesel Oil (DMA, DMB, DMZ)
- Residual Fuel (RMA10, RMB30, RMD80, RME180, RMG180, RMG380, RMG500, RMG700, RMK380, RMK 500, RMK700)

Υπάρχουν, βέβαια, και άλλοι διεθνείς οργανισμοί που διαμορφώνουν τις προδιαγραφές των ναυτιλιακών καυσίμων, όπως οι SAE, ASTM και IP, αλλά το μεγαλύτερο μέρος των προμηθευτών υπακούει στον ISO. (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)

Παρακάτω παρατίθενται κάποια από τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται συχνότερα από τα πλοία:

- Marine Gas Oil (MGO): αυτός ο τύπος καυσίμου είναι ελαφρύ απόσταγμα αργού, καθαρού πετρελαίου και αποτελεί ένα πολύ «καθαρό» καύσιμο. Έχει μικρή περιεκτικότητα σε θείο. Έτσι, αθροιστικά, τα δύο αυτά χαρακτηριστικά το καθιστούν ένα από τα πιο δημοφιλή καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα πλοία. Οι φυσικές του και χημικές του ιδιότητες μοιάζουν με εκείνες του diesel. Έχει διαφανές λαμπερό χρώμα, αλλά βάφεται με κόκκινο χρώμα, για να είναι δυνατή η ανίχνευσή του και, τελικά, να αποτρέπεται η χρήση άλλων «φτωχότερων» «συγγενικών» καυσίμων. Είναι

πολύ σταθερό, όταν βρίσκεται σε κατάσταση μακράς αποθήκευσης και, επιπλέον, δεν απαιτείται προθέρμανση πριν από τη χρήση του. (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)

- Marine Diesel Oil (MDO): αυτός ο τύπος καυσίμου αποτελεί, επίσης, ελαφρύ απόσταγμα αργού, καθαρού πετρελαίου και έχει, επίσης, μικρή περιεκτικότητα σε θείο. Διακρίνεται σε ελαφρύ (light MDO) και σε βαρύ (heavy MDO). Το ελαφρύ MDO, γνωστό με το όνομα marine distillate diesel oil, έχει σκούρο χρώμα, αλλά είναι καθαρό κλάσμα και έχει μικρό ίζημα και απόθεση άνθρακα (<0,2% κ.β.). Μεταφέρεται σε δεξαμενές δεξαμενοπλοίων με επίπεδο πυθμένα. Οι ίδιες δεξαμενες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για να μεταφερθούν και βαρέα κλάσματα αργού πετρελαίου. Το βαρύ MDO αποτελείται από ελαφρύ MDO σε ποσοστό 80-90% και υπολειμματικά καύσιμα σε ποσοστό 20-10%. Έτσι, λόγω της ύπαρξης βαρέων κλασμάτων, χρησιμοποιείται σε ναυτιλιακές μηχανές που είναι σχεδιασμένες ειδικά για αυτό. Επιπλέον, δεν απαιτείται προθέρμανση πριν από τη χρήση του. (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)
- Heavy Fuel Oil (HFO): αυτός ο τύπος καυσίμου ανήκει στην κατηγορία «Βαρύ Μαζούτ». Είναι, δηλαδή, βαριά προϊόντα/υπολείμματα απόσταξης αργού πετρελαίου. Είναι πετρέλαιο εξωτερικής καύσης. Τα υπολείμματα περιλαμβάνουν υπολείμματα ατμοσφαιρικής απόσταξης, υπολείμματα απόσταξης σε κενό, υπολείμματα καταλυτικής πυρόλυσης και υπολείμματα ιξωδύλωσης. Έχει μεγάλο ιξώδες και η περιεκτικότητά του σε θείο είναι υψηλή. Ακόμα, το χρώμα του είναι μαύρο και είναι παχύρρευστο. Ακόμα, απαιτείται προθέρμασή του πριν τη χρήση του. (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)
- Light Fuel Oil (LFO): αυτός ο τύπος καυσίμου ανήκει στην κατηγορία «Ελαφρύ Μαζούτ», δηλαδή «Βαρύ Μαζούτ» στο οποίο έχει προστεθεί κηροζίνη ή άλλο πετρέλαιο εξωτερικής καύσης έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση του ιξώδους. (Εφημερίδα Κυπριακής Δημοκρατίας) Ανήκει και αυτό στα βαριά προϊόντα/υπολείμματα απόσταξης αργού πετρελαίου και πετρέλαιο εσωτερικής καύσης, ενώ το χρώμα του είναι πιο ανοιχτό από αυτό του HFO. Ακόμα, απαιτείται προθέρμασή του πριν τη χρήση του.

Πολλές φορές τα υπολείμματα αργού πετρελαίου (HFO, LFO) δεν πληρούν τις προδιαγραφές που θέτουν οι κατασκευαστές, επειδή έχουν υψηλό κινηματικό ιξώδες και υψηλή πυκνότητα. Για αυτό, για να χρησιμοποιηθούν σε συμβατικούς ναυτιλιακούς κινητήρες, αναμιγνύονται σε καθορισμένες αναλογίες με ελαφρύτερα προϊόντα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η βελτίωση του κινηματικού ιξώδους τους, της πυκνότητάς τους, της περιεκτικότητάς τους σε άνθρακα και βανάδιο και άλλων ποιοτικών τους χαρακτηριστικών. (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)

Ακολουθούν πίνακες που παρουσιάζουν τις ιδιότητες/χαρακτηριστικά των παραπάνω καυσίμων:

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΟΡΙΟ	DMX	DMA	DMZ	DMB	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
Κινηματικό Ιξώδες, 40 °C	mm ² /s	Μεγ.	5,50	6,00		11,00	ISO 3104
		Ελαχ.	1,40	2,00	3,00	2,00	
Πυκνότητα, 15 °C	kg/m ³	Μεγ.	-	890,00		900,00	ISO3675 ISO 12185
Περιεκτικότητα σε θείο	% mm	Μεγ.	1,00	1,50		2,00	ISO 8754 ISO 14596
Περιεκτικότητα σε νερό	% v/v	Μεγ.	-			0,30	ISO 3733
Εξανθράκωμα (10 °C)	% m/m	Μεγ.	0,30			-	ISO 10370
Ολικό υπόστημα	% m/m	Μεγ.					ISO 10307-1
Τέφρα	% m/m	Μεγ.	0,01				ISO 6245
Σημείο ανάφλεξης	°C	Ελαχ.	43,00	60,00			ISO 2719
Σημείο ροής (καλοκαίρι)	°C	Μεγ.	-	0,00		6,00	ISO 3016
Σημείο ροής (χειμώνας)	°C	Μεγ.	-	-6,00		0,00	
Σημείο θόλωσης	°C	Μεγ.	-16,00	-			ISO 3015
Δείκτης κετανίου		Ελαχ.	45,00	40,00		35,00	ISO 4264
Αριθμός οξύτητας	mgKOH/g	Μεγ.	0,50				ASTM D664
Οδειξωτική σταθερότητα	g/m ³	Μεγ.	25,00				ISO 12205
Λυπαντική ικανότητα	Mm	Μεγ.	520,00				ISO 12156-1
Υδρόθειο	Mg/kg	Μεγ.	2,00				IP 570

Πίνακας 9: Ιδιότητες/χαρακτηριστικά MGO και MDO (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΟΠΙΟ	RMA	RMB	RMD	RME	RMG				RMK			ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
			10	30	80	180	180	380	500	700	380	500	700	
Κινηματικό Ιξώδες, 40 °C	mm ² /s	Μεγ.	10,00	30,00	80,00	180,00	180,00	380,00	500,00	700,00	380,00	500,00	700,00	ISO 3104
Πυκνότητα, 15 °C	kg/m ³	Μεγ.	920,00	960,00	975,00	991,00				1010,00			ISO 3675 ISO 12185	
Περιεκτικότητα σε θείο	% m/m	Μεγ.		Εξαρτάται από τις απαιτήσεις της περιοχής χρήσης (ζώνες SECA)										ISO 8754 ISO 14596
Περιεκτικότητα σε νερό	% v/v	Μεγ.	0,30	0,50										ISO 3733
Δείκτης αρωματικότητας CCAI		Μεγ.	850	860			870							
Σημείο ανάφλεξης	°C	Ελαχ.	60,00										ISO 2719	
Σημείο ροής (καλοκαίρι)	°C	Μεγ.	6,00			30,00							ISO 3016	
Σημείο ροής (χειμώνας)	°C	Μεγ.	0,00			30,00								
Αριθμός οξύτητας	mgKOH/g	Μεγ.	2,50										ASTM D664	
Υδροθείο	mg/kg	Μεγ.	2,00										IP 570	
Τέφρα	% m/m	Μεγ.	0,04	0,07			0,10			0,15			ISO 6245	
Ολικό υπόστημα	% m/m	Μεγ.	0,10										ISO 10307-2	
Εξανθράκωμα	% m/m	Μεγ.	2,50	10,00	14,00	15,00	18,00			20,00			ISO 10370	
Νάτριο	mg/kg	Μεγ.	50,00	100,00			50,00			100,00			IP 501 IP 470	
Βανάδιο	mg/kg	Μεγ.	50,00	150,00			350,00			450,00			IP 501 IP 470 ISO 14597	
Αργίλια + Πυρίτιο	mg/kg	Μεγ.	25,00	40,00		50,00	60,00							IP 501 IP 470 ISO 10478
Χρησιμοποιημένα λιπαντικά έλαια (ULO) Ασβέστιο + Ψευδαργυρος ή Ασβέστιο + Φωσφόρος	mg/kg	Μεγ.	Το καύσιμο δεν πρέπει να περιέχει ULO. Ένα καύσιμο θεωρείται ότι περιέχει ULO όταν ικανοποιείται μία από τις εξής συνθήκες: Ασβέστιο > 30 και Ψευδάργυρος > 15 ή Ασβέστιο > 30 και Φωσφόρος > 15											IP 501 ή IP 470 IP 500

Πίνακας 10: Ιδιότητες/χαρακτηριστικά Residual Fuels (Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., Καρώνης Δ. 2014)

Κεφάλαιο 2.2: LNG

Το πιο συνηθισμένο καύσιμο, μετά τα συμβατικά, που χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη ναυτιλία είναι το LNG. Το Liquefied Natural Gas, όπως «μαρτυράει» και το όνομά του, είναι φυσικό αέριο (Natural Gas) το οποίο έχει υγροποιηθεί (Liquefied). Αποτελεί μείγμα υδρογονανθράκων με κύριο συστατικό το μεθάνιο (CH_4) το οποίο βρίσκεται σε ποσοστό 85-96%. Το υπόλοιπο μείγμα συμπληρώνουν άλλοι υδρογονάνθρακες, όπως το αιθάνιο (C_2H_6), το προπάνιο (C_3H_8), το βουτάνιο (C_4H_{10}) και το πεντάνιο (C_5H_{12}), ενώ μικρό μέρος καταλαμβάνει το άζωτο (N_2). (Σουφλής) Γενικά, υπάρχουν τρεις κατηγορίες LNG, ανάλογα με τη σύνθεσή του:

- ελαφρύ (Light) LNG, στο οποίο το κύριο συστατικό, το μεθάνιο, βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 95%
- βαρύ (Heavy) LNG, στο οποίο το αιθάνιο, το προπάνιο, το βουτάνιο και οι υπόλοιποι «δευτερεύοντες» υδρογονάνθρακες βρίσκονται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10%
- LNG με μεγάλη περιεκτικότητα σε άζωτο (Wodek T. 2019)

Σε κάθε περίπτωση, το υγρό αυτό μείγμα είναι άχρωμο, άοσμο και μη τοξικό. (Σουφλής Α. 2021)

Component	Short symbol	Light LNG	Heavy LNG	LNG with high nitrogen content
		(%mol)	(%mol)	(%mol)
methane	C_1	96.15	89.52	93.95
ethane	C_2	2.46	6.89	2.65
propane	C_3	0.91	2.42	0.78
iso-butane	i- C_4	0.24	0.62	0.16
n-butane	n- C_4	0.22	0.47	0.19
nitrogen	N_2	0.02	0.08	2.27
Latent heat of vaporization	(kJ/kg)	508.82	505.58	502.04
Boiling temperature at normal pressure	(K)	112.0	112.5	104.9

Πίνακας 11: Κατηγορίες LNG και η σύστασή τους (Wodek T. 2019)

Για την υγροποίησή του ακολουθείται μία διαδικασία που περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Αρχικά, το φυσικό αέριο εξάγεται από το έδαφος μαζί με νερό και άλλες «ακαθαρσίες». Ακολουθεί ο καθαρισμός του ο οποίος πραγματοποιείται με τη βοήθεια σωληνώσεων αλλά και της βαρύτητας, αφού το αέριο διαχωρίζεται στις σωληνώσεις από τα υπόλοιπα στοιχεία λόγω των διαφορετικών βαρών. Στη συνέχεια, μέσω ενός διαλυτικού μέσου, απορροφώνται το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρόθειο (H_2S) ώστε να μην παγώσουν από την πτώση της θερμοκρασίας. Στην αντίθετη περίπτωση, που τα στοιχεία αυτά δεν απορροφηθούν και, τελικά, παγώσουν, γίνονται εμπόδιο «φράζοντας» τις σωληνώσεις. Για τον ίδιο λόγο αφαιρείται και νερό που έχει απομείνει. Έπειτα, το προπάνιο, το βουτάνιο και ο υδράργυρος εξάγονται είτε για να πωληθούν ξεχωριστά είτε για να χρησιμοποιηθούν, ως ψυκτικά, στη διαδικασία της ψύξης. Τελικά, το καθαρό, πλέον, φυσικό αέριο εισάγεται σε τεράστιους καταψύκτες οι οποίοι απορροφούν τη θερμότητά του μέχρι η θερμοκρασία να φτάσει τους $-162\text{ }^\circ\text{C}$ και, έτσι, υγροποιείται. Με την υγροποίησή του το φυσικό αέριο συρρικνώνεται στο 1/600, δηλαδή σε υγρή κατάσταση καταλαμβάνει 600 φορές μικρότερο χώρο από σε αέρια κατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο, εξυπηρετείται η μεταφορά και η αποθήκευσή του. Μέσω σωληνώσεων, μεταφέρεται στα πλοία LNG για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή σε φορτηγά πλοία για να μεταφερθεί σε μεγάλες ποσότητες σε τοποθεσίες όπου υπάρχει ανάγκη. (shell)

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του LNG είναι το Boil Off Gas. Κατά τη μεταφορά του, μέσα στις δεξαμενές του πλοίου μεταφέρεται ποσότητα θερμότητας στο LNG μέρος του οποίου μετατρέπεται από υγρό σε ατμό. Ο ατμός αυτός μπορεί να μεταβάλλει την ατμοσφαιρική πίεση που υπάρχει στις δεξαμενές και, έτσι, να προκληθεί κάποια διαρροή, πυρκαγιά ή ακόμα και έκρηξη. Για αυτό είναι σημαντικό ο ατμός που δημιουργείται να αφαιρεθεί. Συνήθως, χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την πρόωση του πλοίου ή, αν διατίθεται ο κατάλληλος εξοπλισμός, μπορεί να υγροποιηθεί ξανά με μία ενεργοβόρα, ωστόσο, διαδικασία. Υπάρχουν πολλές αιτίες που συμβαίνει αυτό. Αρχικά, σημαντική ευθύνη φέρει ο περιβάλλοντας χώρος και οι αντλίες που μεταφέρουν θερμότητα στο LNG. Επίσης, αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση και, γενικά, στην ισορροπία των δεξαμενών μπορούν να δημιουργήσουν BOG. Ακόμα, ένας άλλος λόγος είναι το γεγονός ότι, καθώς κινείται το πλοίο, κινείται και το LNG μέσα στις δεξαμενές. Αυτή η κίνηση έχει αποτέλεσμα το LNG να χτυπάει στα γύρω τοιχώματα και, έτσι, να εξατμίζεται. (Σουφλής Α. 2021, fluenta 2022)

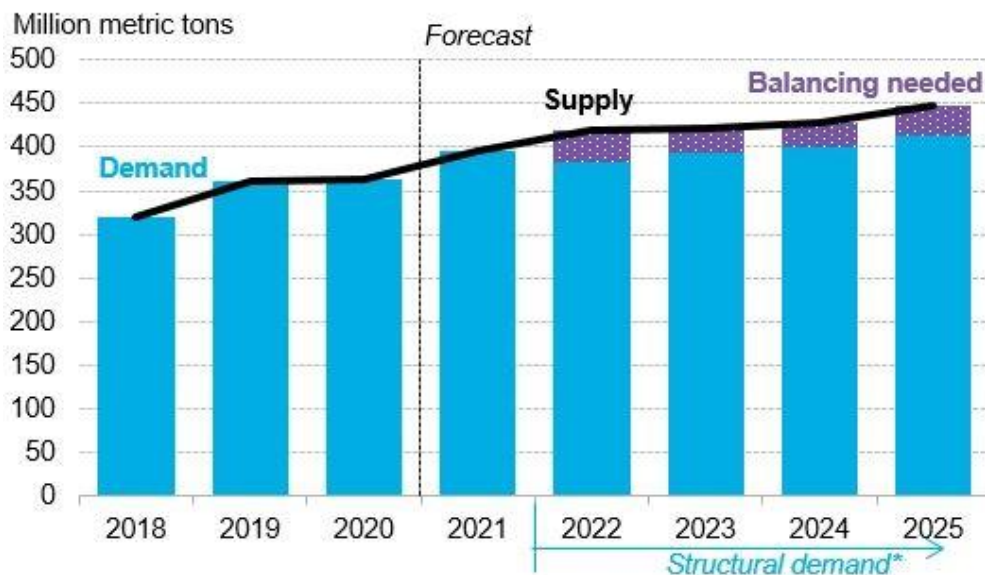
Ένα άλλο χαρακτηριστικό του LNG είναι το λεγόμενο «Methane Slip» και αποτελεί, ίσως, το μοναδικό του μειονέκτημα. «Methane Slip» ονομάζεται το γεγονός καά το οποίο μέρος του βασικού συστατικού, του μεθανίου, δεν καίγεται κατά τη διαδικασία της καύσης. Το γεγονός αυτό είναι μειονέκτημα, διότι, όταν το μεθάνιο δεν καίγεται, συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ωστόσο, στους σύγχρονους δίχρονους κινητήρες αυτό έχει,

πλέον, εξαλειφθεί, ενώ στους τετράχρονους κινητήρες αναμένονται μειώσεις του φαινομένου καθώς αυτοί εξελίσσονται. (Σουφλής Α. 2021)

Από περιβαλλοντικής απόψεως, το LNG είναι ένα καύσιμο το οποίο μπορεί να προσφέρει μεγάλη βοήθεια για την «ανακούφιση» του περιβάλλοντος, αφού πρόκειται ενεργειακά για ένα από τα πιο αποδοτικά καύσιμα. Σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, η χρήση του LNG μπορεί να επιφέρει μείωση των εκπομπών του CO₂ έως και 25% και του παραγόμενου NO_x έως και 90%. Ταυτόχρονα, σχεδόν μηδενίζεται η παραγωγή του SO_x και του PM, δηλαδή η μείωσή τους αγγίζει το 100%. Παράλληλα, καθώς η τεχνολογία προοδεύει και αναπτύσσονται συστήματα τα οποία πρόκειται να μειώσουν την ποσότητα του μεθανίου που δε λαμβάνει μέρος στη διαδικασία της καύσης, η συμβολή του στην προστασία του περιβάλλοντος θα είναι ακόμα πιο μεγάλη. (elengy)

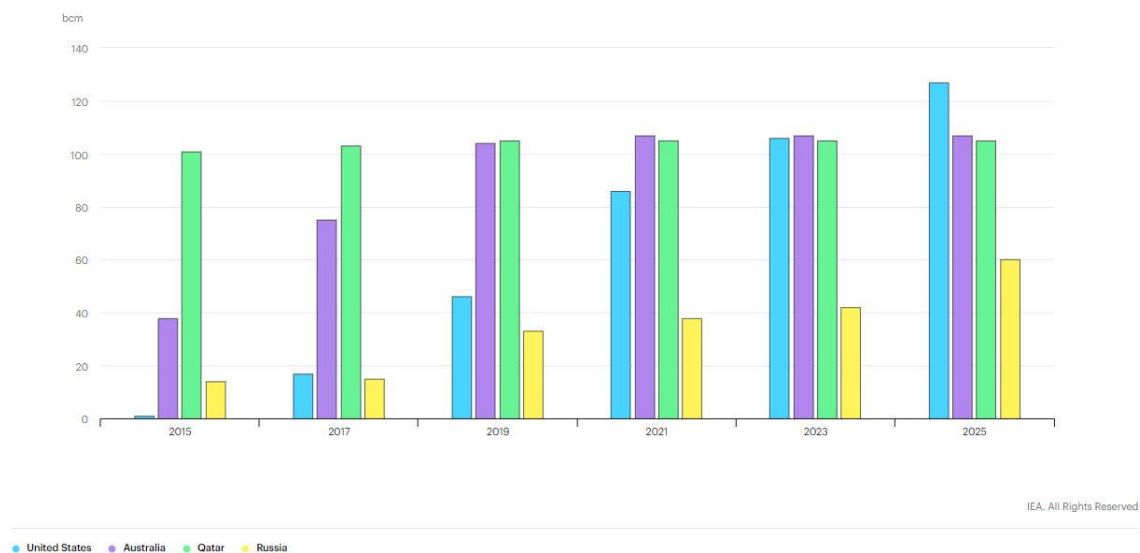
Το LNG χρησιμοποιείται πολλά χρόνια με σχετική ασφάλεια για την ανθρώπινη ζωή και το πλοίο. Δεν είναι εύφλεκτο, ούτε εκρηκτικό και μέσα στις δεξαμενές η πίεση στην οποία υπόκειται είναι η ατμοσφαιρική. Έτσι, είναι δύσκολο να υπάρξουν συμβάντα, όπως πυρκαγιά ή έκρηξη, τα οποία θα απειλήσουν την ζωή του πλοίου και των ανθρώπων πάνω σε αυτό. Τα παραπάνω, μαζί με το γεγονός ότι δεν είναι τοξικό, καθιστούν το LNG ένα ασφαλές καύσιμο, ειδικά σε σχέση με τις υπόλοιπες επιλογές, συμβατικές και εναλλακτικές.

Το LNG, λοιπόν, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, τόσο κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά του, όσο κατά τη χρήση του ως ναυτιλιακό καύσιμο. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι οι βασικές αιτίες που η διεθνής αγορά γύρω από το LNG έχει αυξηθεί πολύ από την εμφανισή του έως και σήμερα, ενώ αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω και, μάλιστα, με γοργούς ρυθμούς. Είναι γεγονός ότι από το 2017 έως το 2019, δηλαδή μέσα σε τρία χρόνια, η ζήτηση του LNG αυξήθηκε κατά 322 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα και, την ίδια περίοδο η προσφορά του LNG αυξήθηκε κατά 270 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Επίσης, το 2025 η προσφορά αναμένεται να φτάσει τους 449 εκατομμύρια μετρικούς τόνους (ποσοστό αύξησης 23% σε σχέση με το 2020) και η ζήτηση θα αυξηθεί, αντίστοιχα κατά 26 – 34 εκατομμύρια μετρικούς τόνους ανά έτος (ποσοστό αύξησης 14% σε σχέση με το 2020).



Διάγραμμα 4: Ζήτηση και προσφορά LNG μέχρι το 2025 (BloombergNEF 2021)

Οι χώρες που κρατούν τα ηνία στην εξαγωγή του LNG είναι η Αυστραλία και το Κατάρ. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια δυναμικά έχουν «ανέβει» οι Ηνωμένες Πολιτίτες της Αμερικής και η Ρωσία, δημιουργώντας προσδοκίες ότι πολύ σύντομα θα ξεπεράσουν τις δύο πρώτες χώρες και θα γίνουν οι μεγαλύτεροι εξαγωγείς LNG. Ακόμα, η μεγαλύτερη ζήτηση LNG έρχεται από την Ασία με την Κίνα να αποτελεί να εισάγει τη μεγαλύτερη ποσότητα LNG. Το 2019, οι χώρες της Κίνας, της Ιαπωνίας και της Νότιας Κορέας αποτέλεσαν το 51% της παγκόσμιας απαίτησης σε LNG. (BloombergNEF 2021)



Διάγραμμα 5: Μεγαλύτερη εξαγωγή LNG ανά χώρα (Hayes A. 2021)

Όσον αφορά τις εφαρμογές του LNG στη ναυτιλία, η πρώτη φορά που έκανε την εμφάνισή του ήταν το 1959 στο πλοίο «Methane Pioneer». Το πλοίο αυτό κατασκευάστηκε το 1945 και αποτέλεσε πλοίο μεταφοράς φορτίου στο δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο. Το 1959, όμως, μετασκευάστηκε σε πλοίο LNG. Κατά τη μετασκευή του, φτιάχτηκαν στο πλοίο δεξαμενές από αλουμίνιο, για μεγαλύτερη ασφάλεια, με χωρητικότητα 5000 κυβικά μέτρα. (marineinsight 2012, ship-technology 2014)



Εικόνα 4: Πλοίο «Methane Pioneer» (helderline.com)

Έκτοτε, η χρήση του LNG ως καύσιμο στη ναυτιλία «κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος» και τα πλοία LNG πληθαίνουν διαρκώς. Την 1^η Ιανουαρίου του 2022 ο παγκόσμιος στόλος περιείχε 654 LNG πλοία, εκ των οποίων τα 254 ήταν σε λειτουργία και τα υπόλοιπα 403 ήταν υπό κατασκευή ή υπό παραγγελία, ενώ θεωρείται πως μέχρι το 2028 ο αριθμός αυτών των πλοίων θα ανέρχεται στα 864. Επιπρόσθετα, παράλληλα με την αύξηση του αριθμού των πλοίων, παρουσιάστηκε και σημαντική αύξηση στο μέγεθος αυτών. Σήμερα, υπάχρουν LNG πλοία διαφόρων μεγεθών με τα πιο μεγάλα να ανήκουν στην κατηγορία Q-Max. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει πλοία μήκους 345 μέτρων, πλάτους 55 μέτρων και κοίλου 12 μέτρων (τυπικές διαστάσεις) και η χωρητικότητά τους σε LNG βρίσκεται στο φάσμα 263000 – 266000 κυβικών μέτρων. Η κατηγορία έκανε την εμφάνισή της πρώτη φορά το 2005 και τα πλοία της τέθηκαν πρώτη φορά σε λειτουργία το 2008. (marineinsight 2012) Το μεγαλύτερο πλοίο φέρει την ονομασία «Mozah». Κατασκευάστηκε το 2009 μαζί με άλλα 13 πλοία - «αδέρφια»

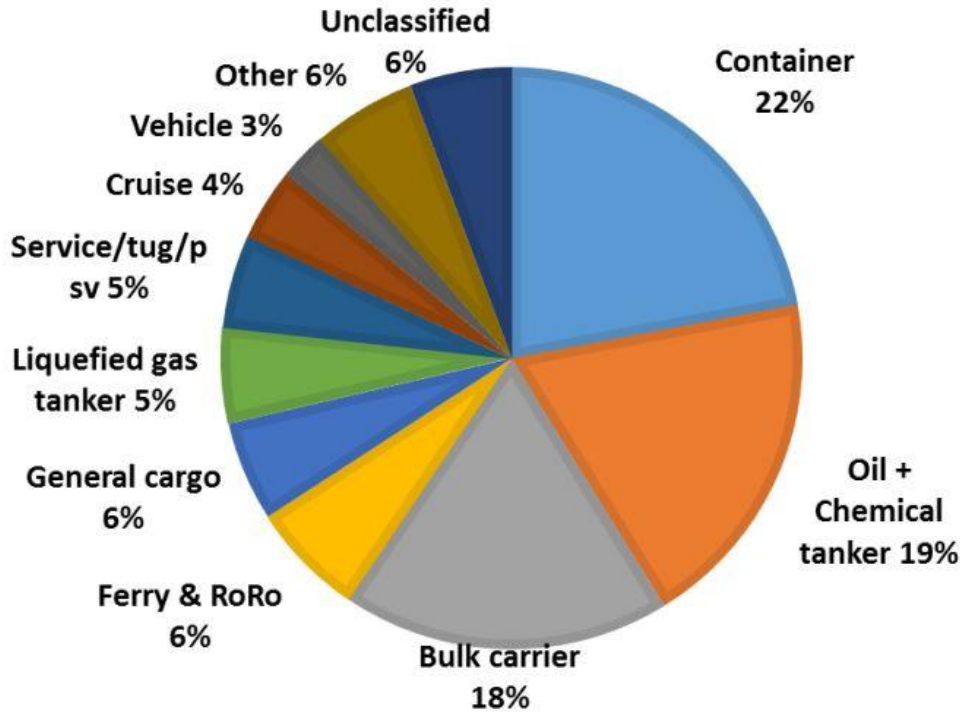
του και η χωρητικότητά τους σε LNG, όπως γίνεται αντιληπτό και από τα παραπάνω, φτάνει τα 266000 κυβικά μέτρα. (riviera 2008)



Εικόνα 5: Πλοίο «Mozah» (Wikipedia.org)

Μετά τα Q-Max ακολουθούν τα, ελαφρώς, μικρότερα Q-Flex. Τα πλοία αυτά κατασκευάστηκαν πρώτη φορά του 2007 και το μήκος τους είναι 315 μέτρα, το πλάτος τους 50 μέτρα και το κοίλο τους 11 μέτρα, ενώ η χωρητικότητά τους σε LNG βρίσκεται μεταξύ 210000 και 217000 κυβικά μέτρα. (marineinshight 2012)

Συνολικά, η εταιρία που κατέχει, σήμερα, το μεγαλύτερο στόλο από LNG πλοία είναι η «Nakilat». Ο στόλος αυτός αποτελείται από 69 πλοία εκ των οποίων τα 24 είναι συμβατικά/συνηθισμένα LNG, ενώ τα 31 είναι τύπου Q-Flex και τα υπόλοιπα 13 είναι τύπου Q-Max. (nakilat) Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα LNG πλοία ανήκουν είναι πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, φορτηγά πλοία και πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην. (Le fever C. 2018)



Διάγραμμα 6: Τύποι πλοίων LNG το 2015 (Le Fevre C. 2018)

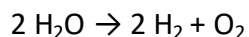
Κεφάλαιο 2.3: Εναλλακτικά καύσιμα

Κεφάλαιο 2.3.1: Υδρογόνο

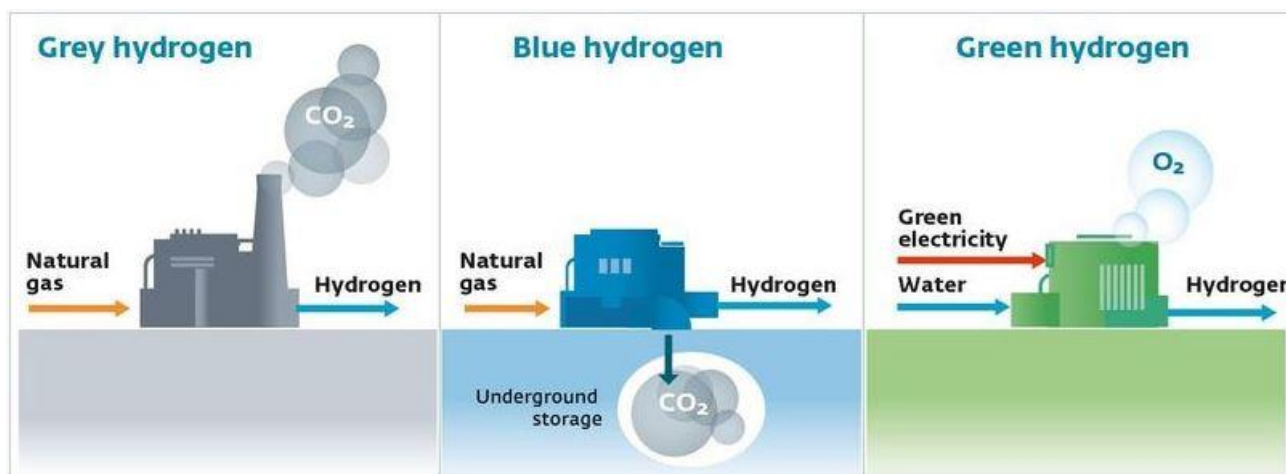
Το υδρογόνο, με μοριακό τύπο H_2 , βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο ως ναυτιλιακό καύσιμο και χρησιμοποιείται, κυρίως, σε κάποιες χώρες όπως η Αγγλία, η Σκωτία, η Γερμανία, η Αυστραλία, η Νορβηγία, η Σουηδία, η Δανία, η Γαλλία, η Κορέα, η Ιαπωνία και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες υδρογόνου, το καφέ, το γκρι, το μπλε και το πράσινο. Κάθε μία διαφέρει από τις άλλες λόγω ως προς τον τρόπο παραγωγής και στο πόσο ρυπογόνο είναι όταν χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Το καφέ υδρογόνο παράγεται από άνθρακα και αποτελεί το 23% του παραγόμενου υδρογόνου παγκοσμίως. Το γκρι υδρογόνο παράγεται από φυσικό αέριο ή από ορυκτό καύσιμο και είναι το πιο συνηθισμένο αποτελώντας το 75% του παραγόμενου υδρογόνου. Το μπλε υδρογόνο παράγεται, επίσης, από φυσικό αέριο ή από ορυκτό καύσιμο αλλά διαφέρει από το γκρι υδρογόνο επειδή, κατά την παραγωγή, χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνολογίες CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) οι οποίες δεσμεύουν το CO_2 που παράγεται και, έτσι, καθιστούν το παραγόμενο υδρογόνο πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Η συγκεκριμένη κατηγορία δε χρησιμοποιείται ακόμα. Τέλος,

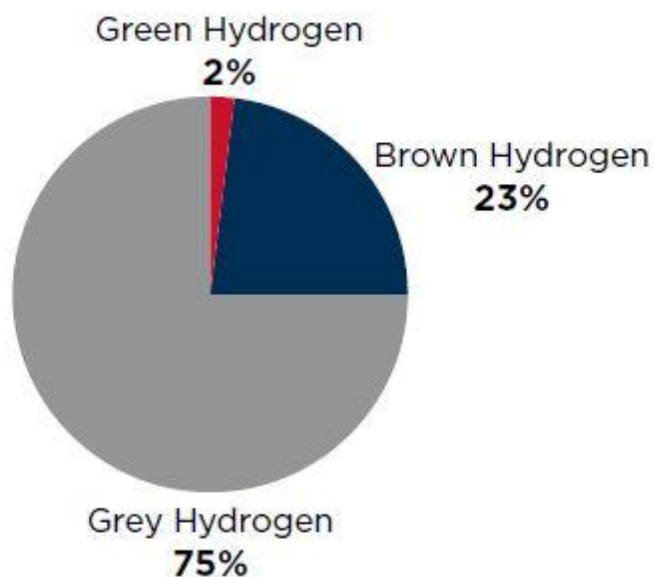
υπάρχει το πράσινο το οποίο παράγεται από τη διάσπαση του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο, σύμφωνα με την χημική αντίδραση:



Η διάσπαση του νερού επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους. Οι δύο πιο κύριοι είναι η ηλεκτρόλυση και η θερμόλυση, οι οποίοι διαφέρουν ως προς το μέσον που χρησιμοποιείται, δηλαδή το είδος της ενέργειας που προσφέρεται, για να διασπαστεί το νερό. Όπως φανερώνουν και οι ίδιες οι λέξεις, κατά την ηλεκτρόλυση παρέχεται ηλεκτρικό ρεύμα (ηλεκτρική ενέργεια), ενώ κατά τη θερμόλυση παρέχεται θερμότητα μέχρι η θερμοκρασία να αυξηθεί πολύ και να διασπάσει το νερό. Το πράσινο υδρογόνο δε χρησιμοποιείται ευρέως, ακόμα, και αποτελεί μόλις το 2% του παραγόμενου υδρογόνου παγκοσμίως. Γενικά, η παραγωγή του υδρογόνου είναι πολύ ενεργοβόρα και η ενέργεια που έχει χρησιμοποιηθεί φτάνει τους 275 μεγατόνους, μέγεθος που αντιστοιχεί στο 2% της παγκόσμιας ανάγκης σε ενέργεια. (ABS 2021)



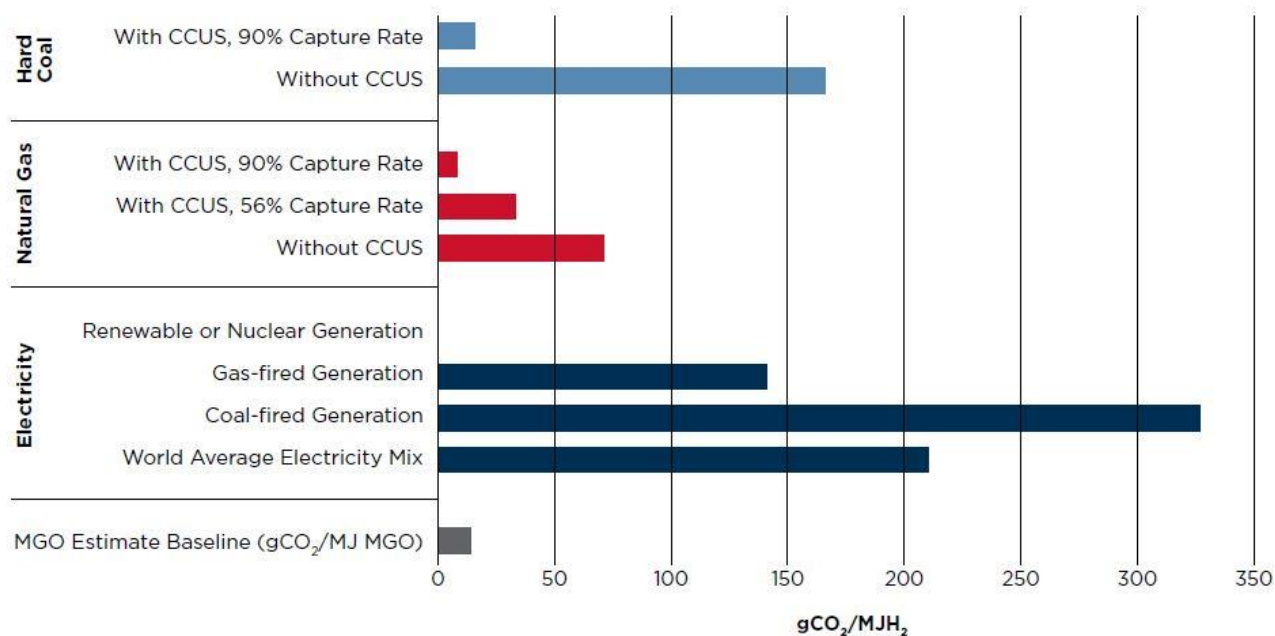
Εικόνα 6: Κατηγορίες υδρογόνου και τρόπος εκάστοτε παραγωγής (Wiebe D., Donev J. 2021)



Διάγραμμα 7: Ποσοστά χρήσης κάθε κατηγορίας υδρογόνου (ABS 2021)

Το υδρογόνο, όπως «μαρτυράει» και ο μοριακός του τύπος δεν περιλαμβάνει θείο (S), συνεπώς ως καύσιμο δεν απελευθερώνει SO_x. Επίσης, δεν περιλαμβάνει άνθρακα (C) αλλά η εκπομπή του CO₂ στην ατμόσφαιρα σχετίζεται με την προέλευση του υδρογόνου. Έτσι, αξίζει να μελετηθεί σε ολά τα στάδια της «ζωής» του.

Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο (Tank-to-Wake emissions) δεν παράγεται μεγάλο ποσό CO₂. Ωστόσο, η παραγωγή του είναι αυτή που καθορίζει αν επιβαρύνει ή αν «ανακουφίζει» το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, παράγονται από 71 kg CO₂ / MJ H₂, όταν πρόκειται για παραγωγή από φυσικό αέριο, έως 166 kg CO₂ / MJ H₂, όταν πρόκειται για παραγωγή από άνθρακα. Με τη χρήση των τεχνολογιών CCUS (μπλε υδρογόνο) οι αριθμοί παρουσιάζονται αρκετά μειωμένοι, ενώ, στην περίπτωση του πράσινου υδρογόνου, οι εκπομπές φτάνουν στο μηδέν. Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, συγκρινόμενο με το MGO που κατά την παραγωγή του εκπέμπονται 14,2 kg CO₂ / MJ H₂, κατά την παραγωγή του υδρογόνου εκπέμπονται από 325 kg CO₂ / MJ H₂ έως 0 kg CO₂ / MJ H₂. (ABS 2021)



Διάγραμμα 8: Εκπομπές CO₂ ανά τύπο υδρογόνου (ABS 2021)

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του, το υδρογόνο αποθηκεύεται και μεταφέρεται σε αέρια ή σε υγρή μορφή μέσα σε κρυογενικές δεξαμενές, με τη θερμοκρασία να βρίσκεται στους -253 °C, ή μέσα σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης, με την πίεση να φτάνει τα 80 MPa, ή, εναλλακτικά, αποθηκευμένο μέσα σε άλλες χημικές ουσίες όπως η αμμωνία. Επιπρόσθετα, παρουσιάζει ικανοποιητικές ομοιότητες με το LNG αλλά έχει και ορισμένες διαφορές. Αρχικά, καταλαμβάνει το διπλάσιο χώρο σε μία δεξαμενή από το LNG. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερες δεξαμενές καυσίμου γεγονός το οποίο, με τη σειρά του, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του φορτίου. Ταυτόχρονα, όμως, είναι 20 φορές ελαφρύτερο από το LNG. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη για μεγαλύτερα πλοία και για νέους σχεδιασμούς. Ακόμα, λόγω της χαμηλής ενέργειας ενεργοποίησης και ανάφλεξης, φλέγεται πιο εύκολα από το LNG. Ταυτόχρονα, παρουσιάζει σημεία υψηλής συγκέντρωσης μέσα στο χώρο όπου ελευθερώνεται και, έτσι, υπάρχει μεγάλο ρίσκο να προκληθεί κάποια έκρηξη. Επιπρόσθετα, η εξάπλωση της πυρκαγιάς γίνεται πιο γρήγορα, όταν έρθει σε επαφή με καθαρό οξυγόνο, πράγμα που σημαίνει ότι οποιαδήποτε διαρροή σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά. Ακόμα, οι φλόγες του υδρογόνου δεν είναι ορατές. Έτσι, ο εντοπισμός της πυρκαγιάς καθίσταται δύσκολος. Όλα τα ανωτέρω υπογραμμίζουν την προσοχή που πρέπει να δοθεί στο θέμα της πυρασφάλειας: το πλήρωμα πρέπει να λάβει την κατάλληλη εκμάθηση, πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλες τεχνολογίες και συστήματα σωληνώσεων και εξαερισμού που εξασφαλίζουν καλή διαχείριση του καυσίμου, της πίεσης και της θερμοκρασίας αυτού, και να τοποθετηθούν ανιχνευτές υδρογόνου, έτσι ώστε να εντοπιστεί άμεσα οποιαδήποτε διαρροή.

Το υδρογόνο ως καύσιμο της ναυτιλίας, όπως ειπώθηκε παραπάνω, είναι σε αρχικό στάδιο. Ωστόσο, ήδη υπάρχουν κάποιες εφαρμογές του είτε σε dual-fuel κινητήρες είτε σε κυψέλες καυσίμου. Το Νοέμβριο του 2017 παραδόθηκε το πρώτο επιβατηγό πλοίου μήκους 14 μέτρων με υδρογόνο ως καύσιμο. Το πλοίο κατασκευάστηκε για να μεταφέρει, με τους δύο dual-fuel κινητήρες του, 16 επιβάτες στον ποταμό Scheldt στο λιμάνι του Antwerp. (ship-technology 2017)



Εικόνα 7: Πλοίο Hydroville (maritime-executive 2017)

Το 2021 παραδόθηκε και το πρώτο πλοίο που κινείται με υγρό υδρογόνο. Ο λόγος για το MF Hydra, ένα πλοίο τύπου Ferry-boat 82 μέτρων για τη μεταφορά 300 επιβατών και 80 αυτοκινήτων στο Rogaland της νοτιοδυτικής Νορβηγίας. Το πλοίο διαθέτει δεξάμενες 80 m³ γεμάτες με LH₂. (sembcomp Marine 2021)



Εικόνα 8: Πλοίο MF Hydra (sembcomp Marine 2021)

Επίσης, το 2022 πρόκειται να παραδοθεί το πρώτο πλοίο ανοικτής θαλάσσης που θα λειτουργεί με κυψέλες υδρογόνου. Το πλοίο θα φέρει το όνομα Hyseas III και θα μεταφέρει 120 επιβάτες και 20 αυτοκίνητα ή 2 φορτηγά στα νησιά Orkney στη βόρεια Σκωτία. (hyseas3)



Εικόνα 9: Σχέδιο πλοίου Hyseas III (hyseas3)

Επιπλέον, η εταιρία C-Job, που ειδικεύεται στο σχεδιασμό νέων πλοίων και στη «βελτίωση» υπάρχοντων πλοίων, σε συνεργασία με την εταιρία LH2 Europe, η οποία παράγει και προμηθεύει υγροποιημένο υδρογόνο κυρίως στην Ευρώπη, ισχυρίζεται ότι έχει σχεδιάσει ένα πλοίο με καινοτόμο και ριζοσπαστικό σχεδιασμό. Με αυτόν το νέο σχεδιασμό υπόσχεται να γίνει πιο εύκολη η μετάβαση στη χρήση υγροποιημένου υδρογόνου λόγω της ικανότητας μεταφοράς μεταλύτερης ποσότητας υδρογόνου. Η εταιρία, λοιπόν, επιχειρεί την κατασκευή ενός φορτηγού πλοίου με κυψέλες υδρογόνου το οποίο θα ανεφοδιάζεται με 37500 κυβικά μέτρα υγρού υδρογόνου. Η καινοτομία του πλοίου βρίσκεται στον σχεδιασμό του ο οποίος περιλαμβάνει γάστρα τετραπεζοειδούς σχήματος. Έτσι, επιλύεται το πρόβλημα που δημιουργείται στην μεταφορική ικανότητα φορτίου και στο απαιτούμενο βύθισμα. Σε όλα τα πλοία, όταν το πλοίο πλέει άφορτο, το κατάλληλο βύθισμα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του έρματος. Στην περίπτωση, όμως, του υδρογόνου, που καταλαμβάνει περισσότερο χώρο αλλά είναι και πιο ελαφρύ από το LNG, η λύση δεν είναι τόσο απλή. Ο σχεδιασμός αυτός, λοιπόν, δημιουργεί αρκετό ελεύθερο χώρο στο κατάστρωμα για την τοποθέτηση των δεξαμενών εξασφαλίζοντας, έτσι, το απαραίτητο βύθισμα και, συνάμα, την απεξάρτηση του πλοίο από το θαλάσσιο έρμα. (c-job)



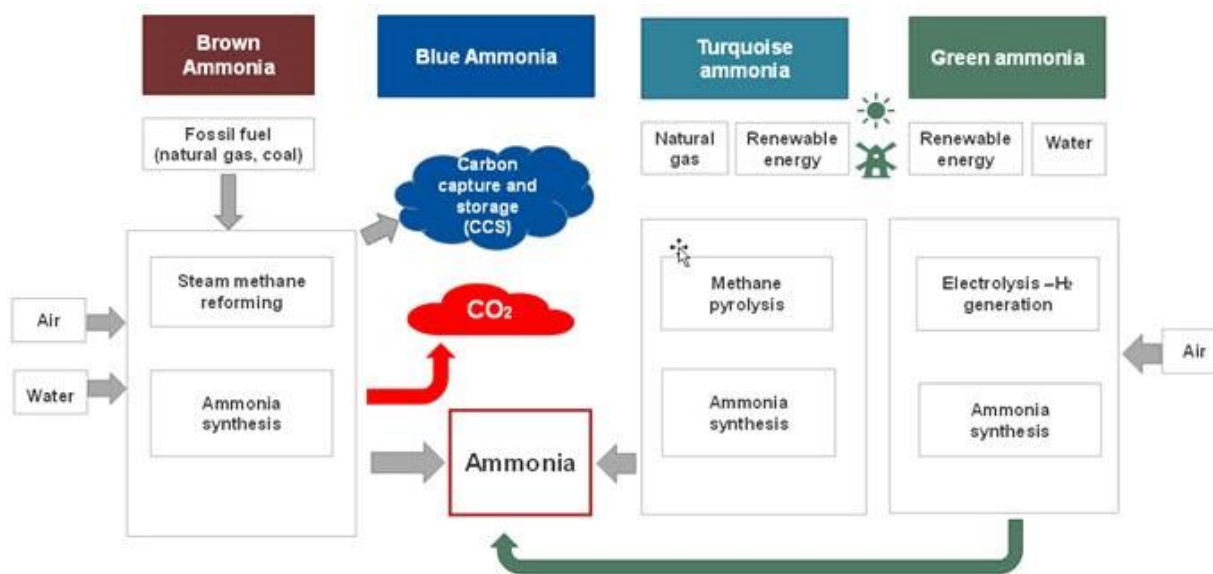
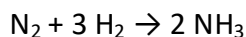
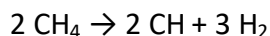
Εικόνα 10: Νέος σχεδιασμός πλοίου με τραπεζοειδή γάστρα (c-job)

Κεφάλαιο 2.3.2: Αμμωνία

Ένα άλλο εναλλακτικό καύσιμο που «υπόσχεται» πολλά για την προστασία του περιβάλλοντος και την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί είναι η αμμωνία. Η αμμωνία έχει μοριακό τύπο NH_3 και, όπως και το υδρογόνο, παρουσιάζει διάφορους τύπους οι οποίοι διαφέρουν μεταξύ τους στον τρόπο παραγωγής και στον αντίκτυπο που έχουν στο περιβάλλον.

Υπάρχουν τέσσερα είδη αμμωνίας: η γκρι, η μπλε, η πράσινη και η τρκουάζ. Η γκρι, ή αλλιώς και καφέ αμμωνία, είναι η «παραδοσιακή» αμμωνία, η πιο συνηθισμένη που παράγεται για πάνω από 100 χρόνια από άνθρακα ή φυσικό αέριο, και αποβάλλει, έτσι, CO_2 στην ατμόσφαιρα. Η μπλε αμμωνία, όπως το υδρογόνο, παράγεται από άνθρακα ή φυσικό αέριο αλλά ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται τεχνολογίες CCUS οι οποίες δεσμεύουν το παραγόμενο CO_2 . Η πράσινη αμμωνία αποτελεί «καθαρή» πηγή αμμωνίας. Με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού και παρέχοντας ενέργεια από εναλλακτικές πηγές παράγεται υδρογόνο το οποίο «συνεργάζεται» με το άζωτο για να παραχθεί τελικά η αμμωνία. Αυτό το είδος δεν έχει ξεκινήσει να παράγεται ακόμα, αλλά ένα μεγάλο εγχείρημα στη Σαουδική Αραβία στοχεύει στην παραγωγή ενός μετρικού τόνου πράσινης αμμωνίας ανά έτος. Τέλος, η τρκουάζ αμμωνία είναι μία κατηγορία ενδιάμεση ανάμεσα στην μπλε και την πράσινη. Κατά

την παραγωγή της εφαρμόζεται η διαδικασία της πυρόλυσης. Με την παροχή θερμότητα και την αύξηση της θερμοκρασίας διασπάται το μεθάνιο σε καθαρό άνθρακα και υδρογόνο. Στη συνέχεια, το υδρογόνο αντιδράει με το άζωτο και, τελικά, παράγεται η αμμωνία. (Tullo A. 2012) Η παραπάνω διαδικασία περιλαμβάνει τις ακόλουθες αντιδράσεις:



Εικόνα 11: Είδη αμμωνίας και τρόποι παραγωγής τους (crugroup.com)

Όσον αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της αμμωνίας, αυτός δηλώνει «υποσχόμενος». Όπως δείχνει και ο μοριακός της τύπος, η αμμωνία δεν περιέχει θείο (S) και, κατά επέκταση, κατά την καύση του δεν εκπέμπονται SO_x. Ακόμα, δεν υπάρχει άνθρακας (C) στον μοριακό τύπο και εκπομπές CO₂ κατά την καύση. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχουν αυξημένες εκπομπές CO₂ ανάλογα με τον τύπο της αμμωνίας και τον τρόπο παραγωγής της. Η γκρι αμμωνία είναι η αρκετά ρυπογόνα. Τα αποτελέσματα, όμως, είναι αρκετά καλύτερα στους άλλους τύπους. Η μπλε αμμωνία εκπέμπει 85% λιγότερο CO₂, συγκριτικά με τη γκρι αμμωνία, και στην περίπτωση της πράσινης αμμωνίας δεν εκπέμπεται CO₂. Ταυτόχρονα, λόγω της ύπαρξης του αζώτου (N), εκπέμπονται NO_x αλλά και N₂O. Τα NO_x δεν προκαλούν ανησυχία καθώς υπάρχουν τεχνολογίες για καταλυτικές αντιδράσεις που χρησιμοποιούνται ήδη σε πολλά πλοία και που μπορούν να εφαρμοστούν και στην περίπτωση της αμμωνίας. Τα N₂O αποτελούν, όμως, πραγματική πρόκληση με την πιο πιθανή λύση να είναι ο περιορισμός τους κατά τη διαδικασία της καύσης. (DNV 2022)

Η αμμωνία παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με το υδρογόνο. Αρχικά, αποθηκεύεται και μεταφέρεται σε υγρή μορφή, πιο εύκολα, στους $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ το υδρογόνο χρειάζεται δεξαμενές με θερμοκρασία $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Huskell C. 2021) Επίσης, παρά το γεγονός ότι έχει χαμηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα, η πυκνότητα αυτή είναι κατά 50% καλύτερη από εκείνη του υδρογόνου και παρόμοια με αυτή της μεθανόλης, καθιστώντας δυνατή την αποθήκευσή της στα πλοία. Ακόμα, φλέγεται πιο δύσκολα. Αυτό, από τη μία αποτελεί πλεονέκτημα στο θέμα της ασφάλειας, καθώς είναι πιο δύσκολο να προκληθεί κάποια πυρκαγιά, αλλά, από την άλλη, δημιουργεί δυσκολίες στην κατασκευή κινητήρων αμμωνίας, αφού η ανάφλεξή της είναι δύσκολη. (Leprince-Ringuet J. 2021)

Ταυτόχρονα, όμως, η αμμωνία σε ναυτιλιακό καύσιμο παρουσιάζει και σημαντικά μειονεκτήματα. Αρχικά, είναι αρκετά τοξική ουσία, σε βαθμό που αποτελεί κίνδυνο για την υγεία των ανθρώπων που έρχονται σε επαφή με αυτήν. Συγκέντρωση 0,25% στον αέρα είναι ικανή ποσότητα για να προκαλέσει θανάτους σε όσους εισπνέουν τον αέρα αυτόν. (Huskell C. 2021) Λύση, βέβαια, στο συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να δώσουν τα διπλά τοιχώματα στις σωληνώσεις που μεταφέρουν αμμωνία. Αυτή η λύση θα την εμποδίσει να ελευθερωθεί στον αέρα που αναπνέουν οι άνθρωποι σε περίπτωση διαρροής και, παράλληλα, θα βοηθήσει στον εντοπισμό κάποιας πιθανής διαρροής. (DNV 2022) Το κύριο, όμως, πρόβλημα είναι αυτό της διαθεσιμότητας της αμμωνίας. Ενώ υπάρχει σύστημα διανομής αμμωνίας, αυτό δε φτάνει στα σημεία που πρέπει ούτε στην απαιτούμενη ποσότητα. Το υπάρχον σύστημα διανομής συνδέει τα σημεία παραγωγής με τα σημεία αποθήκευσης που εξυπηρετούν, κατά κύριο λόγο, τη βιομηχανική αγορά. Επιπρόσθετα, το 80% της αμμωνίας που παράγεται παγκοσμίως διατίθεται στη βιομηχανία λιπασμάτων. Αν το 30% της ναυτιλίας αρχίσει να χρησιμοποιεί την αμμωνία ως καύσιμο, τότε η σημερινή παραγωγή της θα πρέπει να διπλασιαστεί. (Huskell C. 2021) Ακόμα, για να ικανοποιηθούν οι περιβαλλοντικές απαιτήσεις που έχουν τεθεί για το 2050, χρειάζονται 400 εκατομμύρια τόνοι αμμωνίας, οι οποίοι απαιτούν 1000 gWatts ανανεώσιμης ενέργειας για την παραγωγή τους. (Leprince-Ringuet J. 2021)

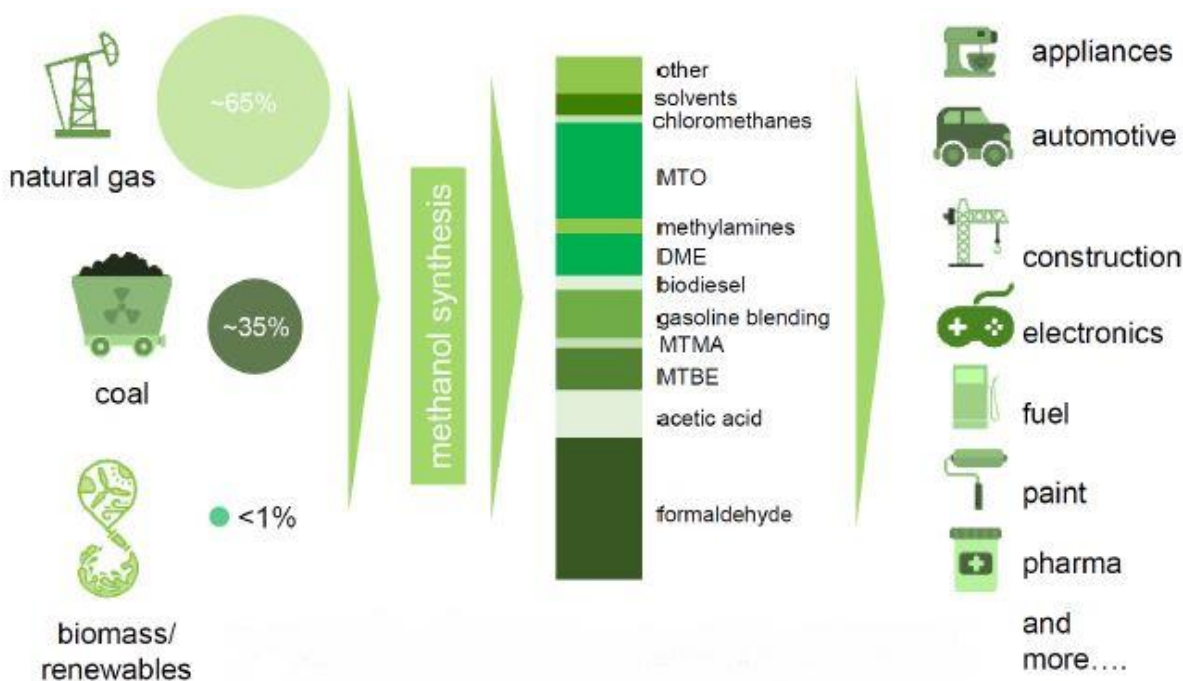
Λόγω των ανωτέρω και άλλων προβλημάτων δεν υπάρχουν ακόμα εφαρμογές καυσίμου αμμωνίας στη ναυτιλία, αλλά γίνεται μεγάλη προσπάθεια προς αυτήν την κατεύθυνση. Οι κατασκευαστές κινητήρων, όπως η Wartsila και η MAN Energy, προσπαθούν να κατασκευάσουν έναν κινητήρα που θα λειτουργεί με αμμωνία μέχρι το 2025. Κατά επέκταση, γίνεται προσπάθεια η πρώτη παράδοση πλοίου με αμμωνία για καύσιμο να γίνει στο δεύτερο μισό της τρέχουσας δεκαετίας. (Tullo A. 2021) Πάντως, πολύ πιθανό είναι το πρώτο πλοίο με αμμωνία να είναι φορτηγό, αφού σήμερα υπάρχουν περίπου 200 φορτηγά πλοία που μπορούν να μεταφέρουν αμμωνία σαν φορτίο. Οι δεξαμενές τους, η κατασκευή τους και η εμπειρία των πληρωμάτων τους στη διαχείριση της αμμωνίας καθιστά αυτήν την κατηγορία πλοίων κατάλληλο και πιθανό υποψήφιο για την πρώτη εφαρμογή. (DNV 2022)

Κεφάλαιο 2.3.3: Μεθανόλη

Η μεθανόλη, ή αλλιώς μεθυλική αλκοόλη, έχει μοριακό τύπο CH_3OH . Κάθε χρόνο αποτελεί ένα από τα πέντε πιο διαδεδομένα χημικά εμπορεύματα, ενώ, μεταφέρεται, διαχειρίζεται και χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές για πάνω από εκατό χρόνια.

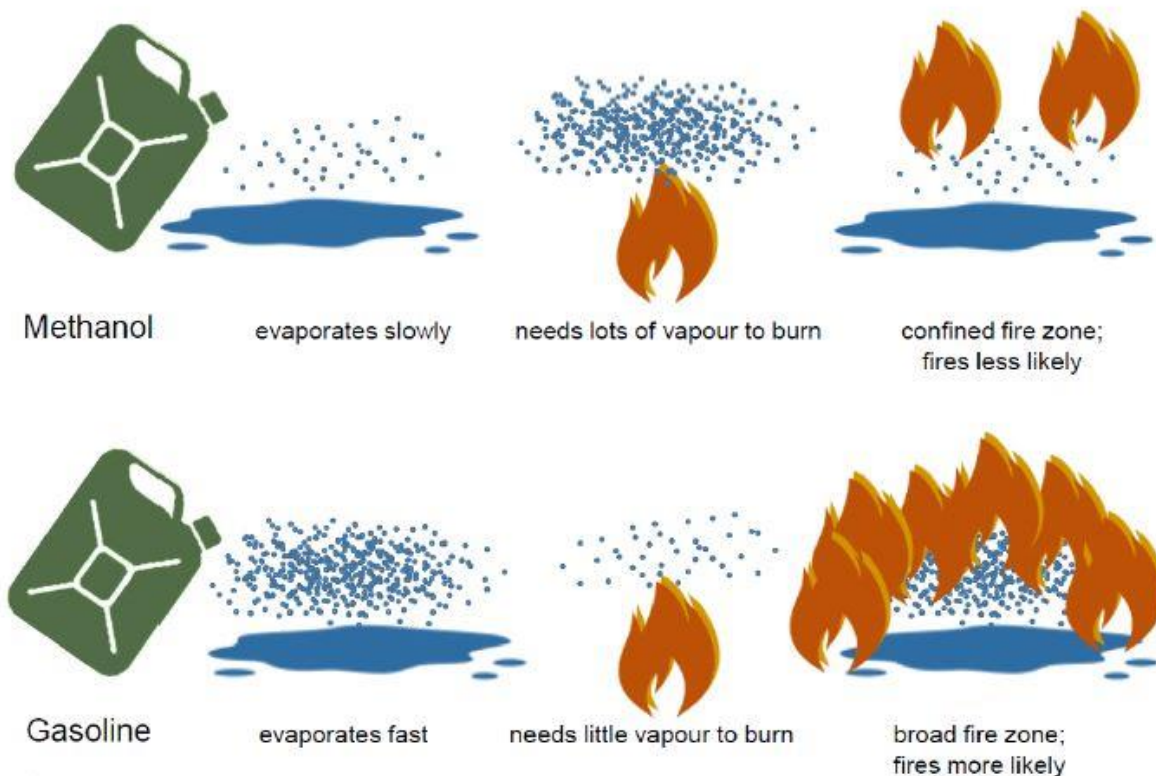
Για την παραγωγή της προαπαιτούμενη είναι η παραγωγή ενός αέριου μείγματος που αποτελείται από CO , CO_2 και υδρογόνο σε αέρια μορφή. Το μείγμα αυτό μπορεί να «παρασκευαστεί» με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι από φυσικό αέριο. Ο δεύτερος είναι από ο,τιδήποτε είναι ή ήταν φυτό, δηλαδή ξυλεία, απορρίματα, αγροτικά απόβλητα και υγρά απόβλητα. Στη δεύτερη περίπτωση η μεθανόλη ονομάζεται βιο-μεθανόλη και, όπως εξηγείται παρακάτω, είναι η πιο σημαντική.

Η μεθανόλη έχει, ή μπορεί μελλοντικά να έχει, πολλές εφαρμογές και χρήσεις. Χρησιμοποιείται σε μείγματα βενζίνης, σε χαμηλό, μέτριο ή υψηλό ποσοστό, βελτιώνοντας την ποιότητα της βενζίνης και αυξάνοντας τη διαθεσιμότητα της. Επίσης, αποτελεί συστατικό για την παραγωγή του Βιο-Ντίζελ. Ακόμα, ενισχύει νέες τεχνολογίες, όπως αυτή των κυψελών καυσίμου, ενώ, για αυτό που έχει γίνει γνωστή στη ναυτιλία είναι η χρήση της ως καύσιμο σε κινητήρες Ντίζελ. (Klein T. 2020)



Εικόνα 12: Παραγωγή και χρήσεις της μεθανόλης (Klein T. 2020)

Η μεθανόλη ως καύσιμο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Αρχικά, η διαθεσιμότητά της είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να διατεθεί σε πολλά λιμάνια. Απαιτούνται, μόνο, κάποιες μικρές τροποποιήσεις στις μονάδες αποθήκευσης και μεταφοράς της για να μπορέσουν να διαθέσουν τη μεθανόλη στα πλοία που φιλοξενούν, ενώ, σήμερα, η διανομή της γίνεται σε 88 από τα 100 μεγαλύτερα λιμάνια του κόσμου. Επίσης, στη χρήση της μοιάζει αρκετά με το φυσικό αέριο LNG, με τη διαφορά ότι η αιθανόλη μπορεί να αποθηκευτεί σε κανονικές, «συνηθισμένες» δεξαμενές, έπειτα από ορισμένες τροποποιήσεις τους. Έτσι, το κόστος επένδυσης είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό που απαιτείται για τη χρήση άλλων εναλλακτικών καυσίμων. Ακόμα, δεν αντιμετωπίζονται προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια της υγείας, της ανθρώπινης ζωής και της ζωής και του ίδιου του πλοίου. Για παράδειγμα, ο κίνδυνος πυρκαγιάς και εξάπλωσης της είναι μικρότερος συγκριτικά με τη βενζίνη.



Εικόνα 13: Ρίσκο πρόκλησης πυρκαγιάς με τη χρήση μεθανόλης και βενζίνης (Klein T. 2020)

Επιπρόσθετα, η μεθανόλη έχει υψηλό αριθμό οκτανίων και η παρουσία του οξυγόνου εντός των μορίων της συντελεί σε μια πιο καθαρή και καλή καύση. Αυτά τα δύο γεγονότα έχουν ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση του κινητήρα και, ταυτόχρονα, μειωμένη κατανάλωση

καυσίμου από τον κινητήρα. Επιπλέον, είναι βιοδιασπώμενη και οι εκπομπές ρύπων που προκαλεί είναι σημαντικά μειωμένες, βοηθώντας, έτσι, στην προστασία του περιβάλλοντος. (Klein T. 2020)

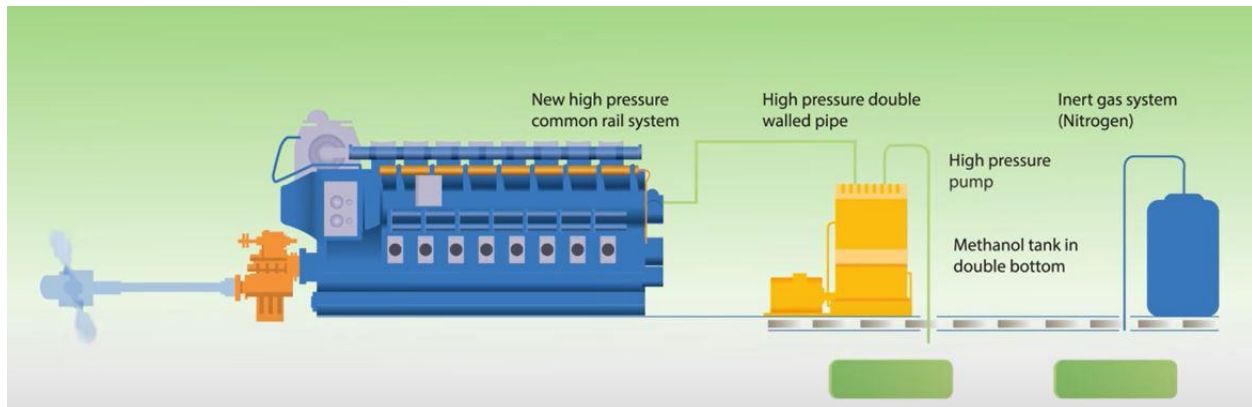
Όσον αφορά το περιβάλλον, ο αντίκτυπος της μεθανόλης είναι, κατά συνθήκη, θετικός. Όταν η μεθανόλη παράγεται από φυσικό αέριο, οι ρύποι κατά τις διαδικασίες Well-to-Tank και Well-to-Wake που παράγονται κατά την καύση της είναι λίγο περισσότεροι από αυτούς που παράγονται με τη χρήση συμβατικών καυσίμων. Ωστόσο, τα οφέλη της βιο-μεθανόλης είναι σημαντικά. Επειδή η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας είναι χαμηλότερη από αυτή του ντίζελ και στο μόριο της δεν απουσιάζουν το θείο και οι συνδέσεις μεταξύ δύο ατόμων άνθρακα, περιορίζονται αισθητά τα NO_x , SO_x και PM. Επιπλέον, μικρή μείωση σημειώνεται και στο CO_2 που ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. (ABS 2021) Σύμφωνα με την «Methanex», τη μεγαλύτερη εταιρία στον κόσμο που παράγει και διανέμει μεθανόλη, η καθαρή μεθανόλη σαν καύσιμο ναυτιλίας μπορεί να μειώσει, συγκριτικά με τη χρήση συμβατικών ναυτιλιακών καυσίμων, τα SO_x κατά 99%, τα NO_x κατά 80%, τα PM κατά 95% και το CO_2 κατά 15%. (methanex)

Η μεθανόλη ως ναυτιλιακό καύσιμο έκανε την εμφάνισή της για πρώτη φορά το 2015. Εκείνη τη χρονιά η εταιρία Stena Line μετέτρεψε κατάλληλα το πλοίο Stena Germanica έτσι ώστε να μπορεί να κινείται χρησιμοποιώντας μεθανόλη. Το πλοίο είναι ferry μήκους 240 μέτρων με την ικανότητα να μεταφέρει 1500 επιβάτες και 300 αυτοκίνητα. (Lloyd's Register 2015)



Εικόνα 14: Πλοίο Stena Germanica (wartsila)

Σύμφωνα με την εταιρία, η τροποποίηση αυτή περιλαμβάνει αντλίες υψηλής πίεσης και σωληνώσεις καυσίμου με διπλά τοιχώματα. (stenaline 2021)



Εικόνα 15: Μηχανολογική εγκατάσταση για χρήση καυσίμου μεθανόλης (stenaline 2021)

Μια άλλη εταιρία που έχει μπει δυναμικά στον «κόσμο της μεθανόλης» είναι η Waterfront Shipping Ltd. η οποία παρέλαβε το 2021 το πρώτο της πλοίο κινούμενο με μεθανόλη. Πρόκειται για το φορτηγό πλοίο Mari Innovator μεγέθους 50000 dwt και μήκους 186 μέτρων με κινητήρα methanol dual-fuel. Η εταιρία συνεχίζει να κάνει παραγγελίες για νέα πλοία κινούμενα με μεθανόλη, και έπειτα από την τελευταία της, η οποία περιλαμβάνει 8 τέτοια πλοία που θα παραδοθούν μέχρι το 2023, ο στόλος της θα αποτελείται στο 60% από τέτοιου είδους πλοία. (Methanex)



Εικόνα 16: Πλοίο Mari Innovator (vesselfinder.com)

Και άλλες εταιρίες ξεκινούν να παραγγέλνουν πλοία κινούμενα με μεθανόλη. Η εταιρία Maersk έχει παραγγείλει 12 πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με ικανότητα μεταφοράς 15000 TEU, ενώ η εταιρία Stena Lines έχει προβεί σε παραγγελία 6 φορτηγών μεγέθους 50000 dwt τα οποία θα εντάξει στο στόλο της το 2023. (hellenicshippingnews 2021)

Κεφάλαιο 2.3.4: Βιο-ντίζελ

Η ιδέα για την παραγωγή και τη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας δεν είναι καινούργια. Το 1893 ο R. Diesel κατασκεύασε έναν κινητήρα που χρησιμοποιούσε το φοινικέλαιο ως πηγή ενέργειας. Το ορυκτό πετρέλαιο όμως εκείνη την εποχή ήταν άφθονο, δεδομένης και της ανακάλυψης μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου στην Αμερική, και η εξόρυξή του και η επεξεργασία του ήταν σχετικά εύκολη. Έτσι αποτελούσε οικονομικότερη λύση και προκρίθηκε ως πηγή ενέργειας. Στην Ευρώπη οι δύο χώρες που ηγούνται στην παραγωγή βιοντίζελ είναι η Γερμανία και η Αυστρία, η οποία μάλιστα έχει αρχίσει να το εμπορεύεται από το 1990.

Το βιοντίζελ θεωρητικά μπορεί να παρασκευαστεί από οποιοδήποτε ζωικό ή φυτικό προϊόν που μετά από κατάλληλη επεξεργασία μπορεί να δώσει λίπος ή έλαιο. Υπάρχουν όμως κριτήρια που καθιστούν ένα προϊόν κατάλληλο για την παραγωγή βιοντίζελ. Τέτοια κριτήρια είναι: η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η απόδοσή τους σε έλαιο, το κόστος τους και η ποιότητά τους. Τα ενεργειακά φυτά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοντίζελ από την παγκόσμια βιομηχανία είναι η ελαιοκράμβη, ο ηλιανθος, το βαμβάκι, η σόγια, η αγριαγκινάρα, ο καπνός, η σουσαμιά, η ρετσίνολαδιά και ο φοίνικας σε περιοχές όπως η Μαλαισία. Αντίθετα σε περιοχές με ψυχρό κλίμα αποφεύγεται, γιατί το βιοντίζελ από φοινικέλαιο παρουσιάζει προβληματική συμπεριφορά στις χαμηλές θερμοκρασίες. Βιοντίζελ παράγεται και από χρησιμοποιημένα βρώσιμα έλαια (τηγανέλαια, yellow grease), ζωικά λίπη και μικροάλγη. Τα φυτικά έλαια εμπεριέχουν τριγλυκερίδια (TG) σε ποσοστό μεγαλύτερο από 98%. Με τη μέθοδο της μετεστεροποίησης (αλκοόλυσης) των τριγλυκεριδίων, όταν σε κάποιο ζωικό ή φυτικό λίπος προστεθεί αλκοόλη και ένας κατάλληλος καταλύτης, τα τριγλυκερίδια μετατρέπονται σε βιοντίζελ, δηλαδή σε αλκοολεστέρες λιπαρών οξέων. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη μετεστεροποίηση ελαίων και λιπών ένα τριγλυκερίδιο, με τη σύγχρονη παρουσία καταλύτη, αντιδρά με μία αλκοόλη και παράγει ένα μίγμα από αλκυλεστέρες των λιπαρών οξέων και γλυκερίνη. Πρόκειται για μια ακολουθία από τρεις διαδοχικές και αντιστρέψιμες αντιδράσεις, όπου ως ενδιάμεσα προϊόντα σχηματίζονται τα διγλυκερίδια και μονογλυκερίδια. (Λόης, Ζαννίκος, Καρώνης 2014)

Η καταλυτική μετεστεροποίηση περιλαμβάνει δύο κατηγορίες: την ομογενή και την ετερογενή. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο αφορά τη φύση του καταλύτη: στην ομογενή μετεστεροποίηση ο καταλύτης και το μίγμα που αντιδρά βρίσκονται στη ίδια φάση, ενώ στην ετερογενή τα αντιδρώντα βρίσκονται σε υγρή μορφή και ο καταλύτης σε στερεά. Στην

περίπτωση αυτή η καταλυτική δράση στο μεγαλύτερο μέρος της περιορίζεται στη διεπιφάνεια ανάμεσα στις δύο διαφορετικές φάσεις, ενώ η κύρια μάζα του στερεού καταλύτη δε συμμετέχει. (Λόης, Ζαννίκος, Καρώνης 2014)

Η παραγωγή, η εμπορία και η χρήση του βιοντίζελ πρέπει να είναι αποδοτική και ανταγωνιστική οικονομικά, ώστε να είναι σε θέση να ανταγωνιστεί το ήδη εδραιωμένο ορυκτό ντίζελ. Έτσι πρέπει να υπολογιστεί το κόστος καλλιέργειας, η απόδοση των φυτών (σε λίτρα ελαίου), το κόστος μετατροπής των ελαίων σε βιοντίζελ αλλά και το κόστος ευκαιρίας. Με τον όρο «κόστος ευκαιρίας» νοείται το κόστος που έχει η θυσία ενός αγαθού για την παραγωγή ενός άλλου. Για παράδειγμα η δέσμευση Χ τόνων σόγιας για την παραγωγή βιοντίζελ αντί η ίδια ποσότητα να διατεθεί για τη σίτιση ανθρώπων. Εδώ μπορεί να αναφερθεί το σχέδιο των ΗΠΑ και της Βραζιλίας για την αύξηση της παραγωγής βιοντίζελ και βιοκαυσίμων γενικότερα στην Αμερικανική ήπειρο με τη δέσμευση πάνω από 260 εκ. στρεμμάτων. Ως εκ τούτου έχει ανακύψει ένα μεγάλο δίλημμα παγκοσμίως γνωστό ως food or fuel και εκφράζει την άποψη αλλά και την ανησυχία ακτιβιστών και επιστημόνων ότι η παραγωγή βιοντίζελ από βρώσιμα λάδια ευθύνεται για την άνοδο της τιμής των τροφίμων, αφού η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται είναι ανταγωνιστική με τις πρώτες ύλες που παράγουν τρόφιμα. (Λόης, Ζαννίκος, Καρώνης 2014) Τις αρνητικές συνέπειες του φαινομένου για τους φτωχούς ανθρώπους της γης αποτυπώνει παραστατικά ο Ed. Mathew, που ανήκει στην οργάνωση Friends of the Earth, στην παρακάτω φράση: «Εάν αρχίσεις να τροφοδοτείς τα αυτοκίνητα με σοδιές, είναι σα να βάζεις αντιμέτωπους 1 δις. πεινασμένους ανθρώπους με 1 δις. ιδιοκτήτες αυτοκινήτων. Και ο αναλυτής Lester Brown υποστηρίζει πως βρισκόμαστε μπροστά στη μεγαλύτερη τραγωδία της ανθρωπότητας καθώς για η Αμερική, για παράδειγμα, αλλάζει καλλιέργειες με καύσιμα για τα αυτοκίνητα. (Tenebaum, D.J., 2008) Εξαιτίας όσων προαναφέρθηκαν γίνονται παγκοσμίως προσπάθειες για την παραγωγή βιοντίζελ από άχυρο, άγλη, γεωργικά απόβλητα και κατεστραμμένα μέρη φυτών, ώστε να μη χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη φυτά που είναι χρήσιμα για τις διατροφικές ανάγκες των ανθρώπων (βιοντίζελ 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς). Από πολλούς το βιοντίζελ τρίτης γενιάς από άγλη (φύκια) αποτελεί τη μόνη λύση και μπορεί να αντικαταστήσει επαρκώς τα συμβατικά καύσιμα, γιατί υπάρχει σε αφθονία, το κόστος παραγωγής βιοκαυσίμου είναι χαμηλό και το βιοντίζελ που παράγεται είναι αβλαβές για το περιβάλλον. Ωστόσο, και όταν το βιοντίζελ παράγεται από χρησιμοποιημένα βρώσιμα έλαια, το κέρδος για το περιβάλλον είναι μεγάλο, αφού αυτά αποβάλλονται από τη διατροφική αλυσίδα και δεν ξαναχρησιμοποιούνται ούτε ως βρώσιμα ούτε για ζωοτροφές. Επίσης αποφεύγονται τα προβλήματα που δημιουργούνται, όταν τα λάδια αυτά καταλήγουν στο αποχετευτικό σύστημα. (Λόης, Ζαννίκος, Καρώνης, 2014)

Το βιοντίζελ είναι ένα καθαρό υγρό βιοκαύσιμο που παράγεται από βιομάζα. Σε σύγκριση με το πετρελαϊκό ντίζελ και τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα το βιοντίζελ είναι μη τοξικό και είναι βιοδιασπώμενο. Ο ρυθμός με τον οποίο βιοαποικοδομείται το βιοντίζελ ελαιοκράμβης σε φιάλη φρέσκου νερού συγκρίνεται με τη δεξτρόζη (δοκιμή ζάχαρης) και είναι δύο φορές συντομότερος από του πετρελαίου ντίζελ. Δεν εμπεριέχει αρωματικές ενώσεις, οι ποσότητες SO_x, αιθάλης, σωματιδιακού καπνού και CO₂ που εκπέμπει είναι πολύ χαμηλές, αυξάνει λίγο ή καθόλου τις εκπομπές NO_x και, επειδή η προέλευσή του είναι βιολογική, συμβάλλει στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. (CO₂ κ.ά.) Το βιοντίζελ έχει φυσικές και χημικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του συμβατικού ντίζελ, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερο σημείο ανάφλεξης, γεγονός που το καθιστά ασφαλέστερο υλικό κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά. Η μέγιστη χρονική περίοδος αποθήκευσης του βιοντίζελ είναι 6 μήνες, ίδια δηλαδή με εκείνη του συμβατικού ντίζελ. Όταν υπάρξει ανάγκη αποθήκευσης μεγαλύτερης διάρκειας απαιτείται η χρήση αντιοξειδωτικών ουσιών, όπως η τοκοφερόλη. Επίσης έχει μικρότερες ποσότητες θείου, που, όπως και ο άνθρακας, είναι στοιχείο βλαβερό για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, μεγαλύτερο αριθμό κετανίου και λιπαντικές ικανότητες καλύτερες από του ορυκτού ντίζελ, γεγονός που καθιστά την καύση του πιο αποδοτική κατά 7%. Η πυκνότητά του είναι σχεδόν ίδια με εκείνη των συμβατικών ναυτιλιακών καυσίμων, γεγονός που σημαίνει ότι χρειάζεται σχεδόν τον ίδιο χώρο αποθήκευσης με αυτά. Είναι κατάλληλο για τις πετρελαιομηχανές που ήδη υπάρχουν και συμβάλλει στην απεξάρτηση από τις εισαγωγές συμβατικών καυσίμων.

Ωστόσο το βιοντίζελ παρουσιάζει και μειονεκτήματα, αφού έχει κατά 6% μικρότερη θερμογόνο δύναμη και υψηλότερο ιξώδες από το ορυκτό ντίζελ. Παράλληλα παρουσιάζει μικρή αύξηση εκπομπών NO_x και είναι ακριβότερο σε σύγκριση με το ορυκτό. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει έντονος προβληματισμός σχετικά με την αλόγιστη πολλές φορές χρήση βρώσιμων ελαίων από τρίτες χώρες για την παραγωγή του, καθώς και για τη αποψίλωση μεγάλων δασικών εκτάσεων, προκειμένου να καλλιεργηθούν βιοκαύσιμα, όπως επισημαίνουν οι Bravo, 2006 και Donald, 2004, η καλλιέργεια βιοκαυσίμων στο παγκόσμιο Νότο απαιτεί τη μεταφορά τους σε άλλες χώρες επιβαρύνοντας το περιβάλλον. Οι Pimentel και Patzek, 2005, εστιάζουν και στο γεγονός ότι κατά τη διαδικασία της μετατροπής της βιομάζας σε υγρό καύσιμο παράγονται τεράστιες ποσότητες από τα αέρια του θερμοκηπίου βλάπτοντας το περιβάλλον. (Altieri, M. , Bravo, E.) Προς την ίδια κατεύθυνση, μια μελέτη του Πανεπιστημίου του Μίσιγκαν υποστηρίζει ότι τα «πράσινα βιοκαύσιμα», στα οποία ανήκει και το βιοντίζελ, βλάπτουν το περιβάλλον περισσότερο από τη βενζίνη. Η εναλλακτική μορφή ενέργειας θεωρείται ότι διαθέτει ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα, διότι τα φυτά από τα οποία παράγεται, καθώς αναπτύσσονται, απορροφούν μόνο το 37% του CO₂ από την ατμόσφαιρα και όταν καίγονται το ποσό αυτό ελευθερώνεται στο περιβάλλον. Άρα η διαδικασία παραγωγής των βιοκαυσίμων αυξάνει την ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου. Βέβαια αξίζει να αναφερθεί ότι η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το Αμερικανικό Ινστιτούτο

Πετρελαίου και για το λόγο αυτό πολλοί επιστήμονες θεωρούν ότι ίσως έχει επηρεαστεί η αμεροληψία της. (naftemporiki 2016)

Αναφορικά με τη χρήση του στη ναυτιλία, το βιοντίζελ

- Παρουσιάζει τάση για οξείδωση και μακροπρόθεσμα προβλήματα αποθήκευσης. Η οξείδωση και η γήρανση του καυσίμου μπορεί να παρουσιάσει:
 - α. υψηλούς βαθμούς οξύτητας που ενδέχεται να δημιουργήσουν βλάβες σε δεξαμενές από αλουμίνιο
 - β. υψηλό ιξώδες και σχηματισμό ιζημάτων και σωματιδίων που φράσσουν τα φίλτρα. Βέβαια, αν κρατηθεί το καύσιμο μακριά από οξυγόνο, μειώνεται ή εξαφανίζεται η οξείδωσή του και αυξάνεται ο χρόνος αποθήκευσης. Στα πλοία όμως αυτό δεν είναι δυνατόν, γιατί οι δεξαμενές τους αερίζονται. Καθώς λοιπόν το βιοντίζελ με την πάροδο του χρόνου υποβαθμίζεται, σε οποιοδήποτε μίγμα, σχηματίζει ενώσεις που θεωρούνται υπεύθυνες για το σχηματισμό σωματιδίων τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στις δεξαμενές καυσίμου, στα φίλτρα, στα συστήματα καυσίμου και στους κινητήρες. Βέβαια οι συνέπειες από τη σταθερότητα κατά την αποθήκευση εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του πλοίου και τις δυνατότητες του συστήματος καυσίμου που διαθέτει.
- Έχει συγγένεια με το νερό και κίνδυνο μικροβιακής μόλυνσης. Είναι υδρόφιλο και «προσφέρεται» για μόλυνση από μικρόβια σε σχέση με το πετρέλαιο. Ως εκ τούτου πρέπει να απομακρύνεται το νερό και να υπάρχουν βιοκτόνα που λειτουργούν καλά. Στη ναυτιλία αυτό είναι δύσκολο, γιατί όλες οι δεξαμενές «αναπνέουν», επειδή ο όγκος και οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται.
- Παρουσιάζει υποβαθμισμένες ιδιότητες ροής σε χαμηλές θερμοκρασίες. Όπως προαναφέρθηκε, το βιοντίζελ είναι υδρόφιλο και η κατακράτηση νερού επηρεάζει τόσο το σημείο ροής όσο και το σημείο θόλωσης.
- Εναποθέτει λιπαρά οξέα-μεθυλ-εστέρες σε επιφάνειες και φίλτρα.
- Σχηματίζει ιζήματα και σωματίδια που εναποτίθενται σε επιφάνειες και φίλτρα και μπορούν να προκαλέσουν βλάβες που θα απαιτήσουν δαπανηρές επισκευές στους κινητήρες.

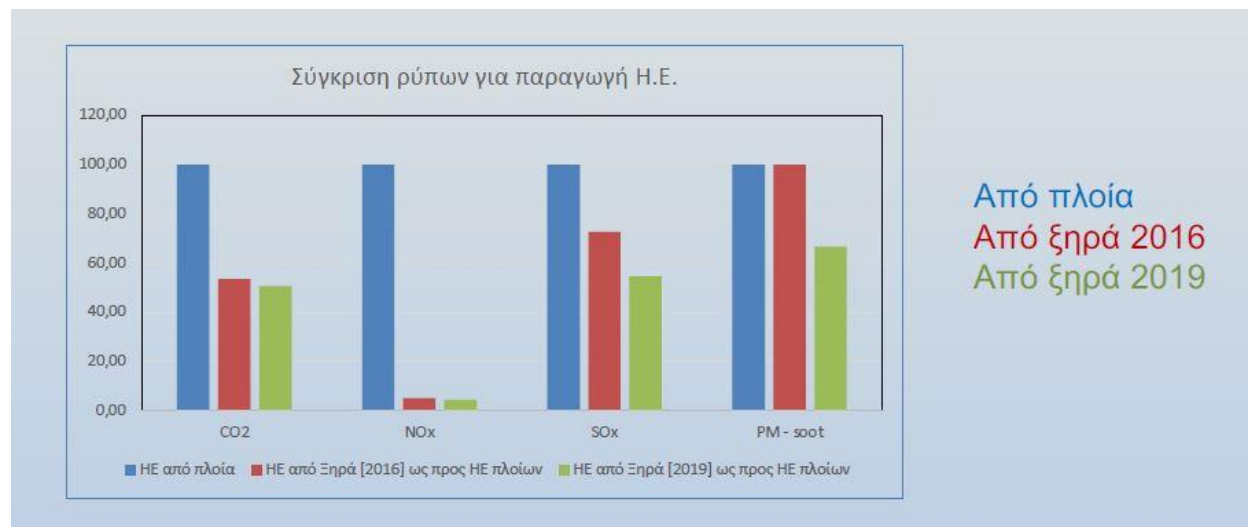
Κεφάλαιο 2.4: Cold Ironing

Ο όρος cold ironing έκανε την εμφάνισή του πρώτη φορά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Τότε, όταν τα πλοία «στάθμευαν» στο λιμάνι, έσβηναν τους ατμοστροβίλους τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται η εξωτερική θερμοκρασία της γάστρας. Πλέον, οι ατμοστροβίλοι έχουν αντικατασταθεί από μηχανές εσωτερικής καύσης, αλλά ο όρος έχει καθιερωθεί. (Παπούτσογλου Θ. 2012)

Η μέθοδος cold ironing καταλαμβάνει σημαντικά μεγάλο μέρος στο «οπλοστάσιο» της ναυτιλίας για την καταπολέμηση της περιβαλλοντικής κρίσης και ρύπανσης και σχετίζεται με

την «τροφοδοσία» «πράσινης ενέργειας» στο πλοίο. Συγκεκριμένα, κατά τον ελλιμενισμό του πλοίου, η ηλεκτρική ενέργεια που είναι απαραίτητη για την κάλυψη διαφόρων αναγκών, όπως η φορτοεκφόρτωση, ο ανεφοδιασμός, η θέρμανση, ο κλιματισμός, ο φωτισμός και η λειτουργία άλλων ηλεκτρολογικών συστημάτων, δεν παρέχεται από τη λειτουργία των βοηθητικών γεννητριών, αλλά από δίκτυο ηλεκτροδότησης, με το οποίο συνδέεται το πλοίο, που βρίσκεται στη στεριά. Με αυτόν τον τρόπο, οι βοηθητικές μηχανές παραμένουν ανενεργές και, έτσι επιτυγχάνονται σημαντικά περιβαλλοντικά, οικονομικά και άλλα οφέλη. (Παπαμιχαήλ Γ. 2019) Δεν υπάρχει ακριβής ελληνική ορολογία για τη μέθοδο, ενώ συχνά συναντάται και ως Alternative Maritime Power (AMP), Ship-to-Shore Interconnection και Onshore Power Supply (OPS). (Προυσαλίδης Ι. 2021)

Το cold ironing παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων και οφελών. Τα κυριότερα από αυτά, που αποτελούν και τον αρχικό λόγο που εφαρμόστηκε η μέθοδος, είναι τα περιβαλλοντικά οφέλη. Αφού κατά τον ελλιμενισμό όλες οι μηχανές του πλοίου παραμένουν ανενεργές οι ρύποι που εκπέμπονται από αυτές είναι μηδενικοί και, συνεπώς, μειώνονται οι συνολικές εκπομπές ρύπων κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου. Έρευνα, που πραγματοποιήθηκε από το ινστιτούτο του Νεπάλ «Shambhunath Institute of Engineering and Technology» (SIER) το 2011, έδειξε πως έπειτα από δέκα ώρες χρήσης οι ρύποι ενός κρουζιερόπλοιου ήταν αρκετά μειωμένοι. Πιο συγκεκριμένα, το διοξείδιο του άνθρακα μειώθηκε στους 50,1 τόνους από τους 72,2, τα οξείδια του αζώτου μειώθηκαν σε 0,04 τόνους από τους 1,47 και τα οξείδια του θείου μειώθηκαν στους 0,04 τόνους από τους 1,23. Σε άλλη έρευνα, που πραγματοποιήθηκε από το «Edinburgh Napier University» του Ενδιμβούργου της Σκωτίας και το «Kedge Business School» του Μπορντώ της Γαλλίας, σημειώθηκε ότι ετησίως εξοικονομούνται 108 τόνοι NO_x, 2,7 τόνοι PM και 4767 τόνοι CO₂. (safety4sea 2019)



Εικόνα 17: Σύγκριση ρύπων πλοίων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κινητήρες και από cold ironing (Προυσαλίδης Ι. 2021)

Επιπρόσθετα, με τη χρήση του cold ironing μειώνεται το παραγόμενο ποσό θερμότητας που ελευθερώνεται στο περιβάλλον και η ηχορρύπανση. (Δανιήλ Α. 2018) Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με όλο και πιο φιλικούς για το περιβάλλον τρόπους. (Προυσαλίδης Ι. 2021)

Σημαντικά είναι και τα οικονομικά οφέλη που προσφέρει το AMP. Αρχικά, αφού οι μηχανές παραμένουν ανενεργές δε γίνεται κατανάλωση καυσίμου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται και αγοράζεται συνολικά. Ταυτόχρονα, οι μηχανές συνολικά λειτουργούν για λιγότερες ώρες παρατείνοντας, έτσι, τη διάρκεια ζωής τους και την αγορά νέου κινητήρα και καθυστερώντας τις εκάστοτε προγραμματισμένες συντηρήσεις και επισκευές. Ακόμα, αφού οι εκπεμπόμενοι ρύποι είναι λιγότεροι, μειωμένη θα είναι και η αντίστοιχη φορολογία. Επίσης, η Ευρωπαϊκή Ένωση χορηγεί επιδοτήσεις, ώστε να κατασκευάζονται ή να μετασκευάζονται πλοία που θα έχουν δυνατότητα λήψης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο του λιμανιού. Οι επιδοτήσεις αυτές αποτελούν κίνητρο για την επίτευξη της επένδυσης αφού, αν και δεν αποτελούν άμεσο κέρδος για τους πλοιοκτήτες, μειώνουν το αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται και βοηθούν στην ταχύτερη απόσβεση του.

Επιπρόσθετα, η εργασία στο λιμάνι και πάνω στο πλοίο γίνεται σημαντικά καλύτερη, επειδή ο εργαζόμενος εκτίθεται σε μία λιγότερο ρυπασμένη ατμόσφαιρα και εργάζεται κάτω από μικρότερο θόρυβο. Τέλος, σημαντικό όφελος αποτελεί το «πράσινο προφίλ» που αποκτά η πλοιοκτήτρια εταιρεία. Με την εγκατάσταση στα πλοία της του απαραίτητου εξοπλισμού για τη χρήση cold ironing, η κοινότητα της ναυτιλίας και η κοινωνία αντιλαμβάνεται ότι η εταιρεία είναι ευαίσθητη σε θέματα που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος και, κατά επέκταση, την προστασία της ανθρώπινης υγείας και ζωής.

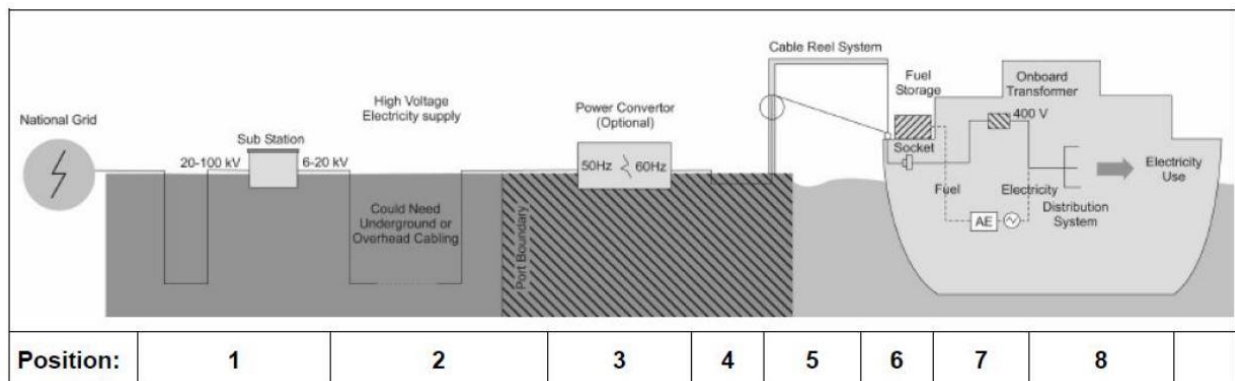
Η εφαρμογή της μεθόδου OPS, ωστόσο, δεν είναι πάντα εύκολη αλλά παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες. Αρχικά, σημαντικό είναι το ζήτημα της παροχής επιπλέον ηλεκτρικής ενέργειας στους λιμένες. Ενώ υπάρχει δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος για τις ανάγκες του λιμανιού, η ποσότητα της προσφερόμενης ενέργειας δεν επαρκεί ώστε να καλύψει και τις ανάγκες ενός ή περισσότερων πλοίων τα οποία προσδένουν εκεί. Ωστόσο, σημαντικό είναι το ζήτημα: πόση περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια απαιτείται να χορηγηθεί; Η απάντηση αυτού του ερωτήματος δεν είναι εύκολη και απαιτεί σύνθετους υπολογισμούς, ώστε να μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες των τωρινών (γνωστοί οι διαφορετικοί τύποι και τα μεγέθη και γνωστός αριθμός πλοίων) καθώς και των μελλοντικών πλοίων (άγνωστοι οι διαφορετικοί τύποι και μεγέθη και άγνωστος αριθμός πλοίων) που πρόκειται να προσδέσουν στο εκάστοτε λιμένα. Σημειώνεται ότι απαιτείται διαφορετική ποσότητα ενέργειας για διαφορετικό τύπο και διαφορετικό μέγεθος πλοίου. Ακόμα, πρόβλημα αποτελεί η αδυναμία καθιέρωσης σταθερού εξοπλισμού. Τα πλοία, ανάλογα με τον τύπο, το μέγεθος και άλλους παράγοντες, λειτουργούν

με ηλεκτρικό ρεύμα διαφορετικής τάσης, χαμηλής και υψηλής, και διαφορετικής συχνότητας 60 Hz και 50 Hz, προκειμένου να επιτύχουν τις απαιτούμενες ποσότητες ισχύος. (safety4sea 2019)

Vessel type	LV	HV	50 Hz	60 Hz
Container<140m	100%	0%	63%	37%
Container>140m	80%	12%	6%	94%
Ro-Ro	100%	0%	30%	70%
Oil tankers	100%	0%	20%	80%
Cruise ships<200m	100%	0%	36%	64%
Cruise ships>200m	12%	88%	0%	100%

Πίνακας 12: Τάσεις και συχνότητες λειτουργίας για διαφορετικούς τύπους πλοίων (Πανατζόπουλος Δ. 2017)

Στην τεχνολογία cold ironing στα μεγάλα λιμάνια ως πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται το δημόσιο σύστημα ηλεκτροδότησης ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια από αιολικούς σταθμούς (θαλάσσιους και χερσαίους), ηλιακή ενέργεια από μονάδες παραγωγής της, υδροηλεκτρική ενέργεια από υδροταμιευτήρες, ενέργεια από τα θαλάσσια κύματα, τη βιομάζα και από φυσικό αέριο. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει λάβει μέτρα σχετικά με τη βιώσιμη ανάπτυξη θεσπίζοντας κανονισμούς και οδηγίες. Συμπληρωματικά εισήγαγε περιβαλλοντικές συστάσεις, όπως η 2006/339/EC η οποία προωθεί την ηλεκτροδότηση από τη στεριά (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2006).



Εικόνα 18: Διάταξη πρότασης 2006/339/EC (Δανιήλ Α. 2018)

Τα στοιχεία του συστήματος είναι:

1. Ένας τοπικός υποσταθμός όπου η τάση της ηλεκτρικής ενέργειας από το εθνικό δίκτυο (20 – 100 kV) μετασχηματίζεται σε 6 – 20 kV
2. Καλώδια μεταφοράς της ισχύος των 6 – 20 kV στις αποβάθρες
3. Μετατροπή ισχύος όπου χρειάζεται
4. Καλώδια διανομής της ισχύος στον λιμένα
5. Ειδικό σύστημα περιέλιξης των καλωδίων υψηλής τάσης στο άκρον της αποβάθρας για την ανύψωση των καλωδίων που οδηγούν στο πλοίο
6. Πρίζα στο πλοίο
7. Μετασχηματιστής στο πλοίο που θα μετασχηματίζει την υψηλή τάση σε 400 V
8. Το ρεύμα διανέμεται στο πλοίο με τις γεννήτριες ανενεργές

Στη σύσταση αναφέρεται ότι όλα τα κράτη μέλη της Ε.Ε. πρέπει να σκεφτούν την εγκατάσταση σταθμών για την ηλεκτροδότηση των πλοίων από τη στεριά, ιδιαίτερα σε λιμάνια όπου οι τιμές των ρύπων είναι υψηλότερες από τα επιτρεπτά όρια και τα επίπεδα θορύβου είναι επίσης υψηλά. Προκειμένου το πλοίο να συνδεθεί με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός.



Εικόνα 19: Σύστημα περιέλιξης καλωδίων (safety4sea 2019)



Εικόνα 20: Εγκατάσταση συστήματος cold ironing στο πλοίο (wartsila)

Το ISO/IEK/IEEE 80005-1:2012 είναι το πρότυπο που αφορά στο σχεδιασμό, στην εγκατάσταση και στον έλεγχο των συστημάτων υψηλής τάσης (HVSC), στη στεριά και στο πλοίο, προκειμένου το πλοίο να προμηθευτεί ηλεκτρική ενέργεια από την ξηρά. Η τυποποίηση περιγράφει τα συστήματα:

- Διανομής υψηλής τάσης στη στεριά (HV)
- Διανομής στο πλοίο
- Παρακολούθησης, ελέγχου, σύμπλεξης και διαχείρισης της ενέργειας
- Τον εξοπλισμό σύνδεσης στεριάς και πλοίου
- Τους μετασχηματιστές και τους αντιδραστήρες
- Τους ημιαγωγούς και τους περιστρεφόμενους μετατροπείς. (Δανιήλ Α. 2018)

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το πλοίο να είναι σε λειτουργία και όχι σε δεξαμενισμό ή διάφορες επισκευές συντήρησης. (iso 2012)

Ο εξοπλισμός που είναι απαραίτητος στο λιμάνι περιλαμβάνει:

- Τον υποσταθμό διανομής, αφού η ισχύς των υπαρχόντων υποσταθμών στα λιμάνια δεν επαρκεί για να καλύψει τις πολλαπλές και υψηλές ανάγκες των πλοίων, που ελλιμενίζονται εκεί, σε ηλεκτρική ενέργεια

- Τον μετατροπέα συχνότητας, που μετατρέπει τη συχνότητα της τάσης λειτουργίας του δικτύου στεριάς (50Hz) στη συχνότητα των ηλεκτρικών συστημάτων των περισσότερων πλοίων (60Hz)
- Το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης και ελέγχου της συνολικής διαδικασίας (σύστημα εποπτείας τύπου SCADA)

Ο εξοπλισμός διασύνδεσης πάνω στο πλοίο περιλαμβάνει:

- Έναν πίνακα “shore connection” που είναι εγκατεστημένος πλησίον του σημείου πρόσδεσης του πλοίου, στο ανώτερο κατάστρωμα και είναι κατάλληλα διαμορφωμένος για να μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια της σύνδεσης στον κεντρικό πίνακα διανομής του πλοίου
- Ένα σύστημα ενεργειακής διαχείρισης για να παρακολουθεί τη διασύνδεση και να έχει τη δυνατότητα παραλληλισμού των ηλεκτρογεννητριών
- Ένα ειδικό καλώδιο που να διασυνδέει το σημείο ηλεκτροδότησης στο λιμάνι με τον πίνακα διασύνδεσης στο πλοίο. (Προυσαλίδης 2020)

Με την αύξηση της ανησυχίας για το περιβάλλον, αλλά και για τις τιμές του πετρελαίου, η OPS κερδίζει όλο και περισσότερο το ενδιαφέρον των ΜΜΕ, των ναυτιλιακών εταιρειών και των λιμανιών. Μέχρι το 2012 μόνο μερικά λιμάνια της Βαλτικής είχαν ενεργοποιηθεί στη χρήση OPS, αλλά το ενδιαφέρον για αυτήν όλο και αυξάνεται, καθόσον τα άμεσα οφέλη είναι μεγάλα: η ενέργεια παράγεται με ολοένα και πιο φιλικούς τρόπους για το περιβάλλον, οι γεννήτριες του πλοίου παύουν να λειτουργούν και, λόγω των Α.Π.Ε. και της σταδιακής απεξάρτησης από τον άνθρακα, η περιβαλλοντική κατάσταση βελτιώνεται διαρκώς. (Προυσαλίδης 2021)

Στις ΗΠΑ:

- Το POLA (Port Of L.A.), το 2004, ήταν το πρώτο λιμάνι στον κόσμο που εφάρμοσε την τεχνολογία cold ironing στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.
- Το POLB (Port of Long Beach) το 2008 εγκατέστησε την OPS η οποία μειώνει δραματικά την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα φορτηγά πλοία. Η ιδιαιτερότητα του έργου είναι ότι αυτό αποτελεί την πρώτη ηλεκτρική σύνδεση παγκοσμίως για δεξαμενόπλοια, τα οποία μεταφέρουν πολύ εύφλεκτα φορτία.
- Το λιμάνι του Oakland, το τέταρτο πιο πολυσύχναστο λιμάνι για κοντέινερς, το 2007, επένδυσε 275.000 δολάρια σε μια νέα τεχνολογία εναλλακτική της κλασικής cold ironing στην οποία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται LNG αντί για το ηλεκτρικό δίκτυο. (Παπούτσογλου Θ. 2012)
- Στο λιμάνι του Seattle το 2005, εφαρμόστηκε σύστημα OPS για κρουαζιερόπλοια. (Δανιήλ Α. 2018)

Στην Ευρώπη:

- Το λιμάνι του Godeborg, στη Σουηδία, είναι το πρώτο λιμάνι στον κόσμο που το 2000 υιοθέτησε την τεχνολογία cold ironing. Επειδή το λιμάνι είναι στην ουσία μέρος της πόλης, με τον τρόπο αυτό επιχειρείται να μειωθούν τόσο ο θόρυβος όσο και οι εκπομπές ρύπων. (Παπούτσογλου Θ. 2012) Επίσης, το λιμάνι αυτό είναι το πρώτο στον κόσμο που χρησιμοποίησε σύνδεση υψηλής τάσης με το πλεονέκτημα να υπάρχει η δυνατότητα να μεταφερθούν μεγάλες ποσότητες ισχύος με λεπτότερα και λιγότερα καλώδια (Πανταζόπουλος Δ. 2017)
- Το λιμάνι της Στοκχόλμης, στη Σουηδία επίσης, ήδη από το 1985 έχει τοποθετήσει εγκαταστάσεις ενέργειας από τη στεριά. Το 2006 άρχισαν να χρησιμοποιούνται νέα συστήματα cold ironing χαμηλής τάσης.
- Το λιμάνι του Antwerp είναι ένα ακόμη ευρωπαϊκό λιμάνι που το 2008 εγκατέστησε, με μία επένδυση 1117828 ευρώ, σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία κατά τον ελλιμενισμό με σκοπό να μειώσει την ατμοσφαιρική ρύπανση. (Παπούτσογλου Θ. 2012)
- Το λιμάνι του Ρότερνταμ στην Ολλανδία είναι το πρώτο λιμάνι της χώρας που το 2012 εγκατέστησε OPS για τα πλοία με την προσδοκία να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων και η ηχορρύπανση και να βελτιωθεί η ποιότητα του αέρα στη γύρω περιοχή. (Δανιήλ Α. 2018)

Στον υπόλοιπο κόσμο χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Σαγκάης στην Κίνα που έχει εκπονήσει μια μελέτη για την εγκατάσταση και χρήση τεχνολογίας cold ironing. Αλλά και άλλα λιμάνια στον κόσμο εκφράζουν την ανησυχία τους για τη ρύπανση σχεδιάζουν την υιοθέτηση πράσινων τεχνολογιών. (Παπούτσογλου Θ. 2012)

Στην Ελλάδα το πρώτο λιμάνι στο οποίο εφαρμόζεται ηλεκτρική διασύνδεση είναι εκείνο της Κυλλήνης. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου EL.E.MED (Electrification in the Eastern Mediterranean) με συγχρηματοδότηση του Ταμείου Συνοχής και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Innovation and Networks Executive Agency (INEA). (Προυσαλίδης, Κουρμπέλης, Λυρίδης) Τα λιμάνια του Πειραιά και της Ραφήνας συμμετέχουν στο έργο «European Flagship Action for cold ironing in ports» (EALING), για να γίνουν μελέτες σχετικές με την εφαρμογή ηλεκτρικής διασύνδεσης πλοίων που ελλιμενίζονται σε 16 λιμάνια της Ευρώπης. (Προυσαλίδης 2021)

Κεφάλαιο 2.5: Fuel EU Maritime regulation

Πρόκειται για έναν κανονισμό που ψηφίστηκε από τον IMO και θα τεθεί σε ισχύ από την 1^η Ιανουαρίου 2025, ενώ έχει κατατεθεί ως πρόταση και στο ευρωπαϊκό κοινοβούλιο. Ο κανονισμός αυτός περιέχει μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των ρύπων, που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, για κάθε τύπο καυσίμου, θέτει στόχους μείωσης των ρύπων

αυτών εντός χρονικού πλαισίου και καθιερώνει ποινές για όσους δε συμμορφώνονται με αυτόν.

Στόχος του κανονισμού είναι να δοθούν κίνητρα στις πλοιοκτήτριες εταιρίες ώστε να χρησιμοποιήσουν «πράσινα» καύσιμα που δεν συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ή που η συμβολή τους σε αυτό είναι σημαντικά μικρή. Απώτερο σκοπό αποτελεί η μείωση των παραπάνω ρύπων κατά 75%, ανά μονάδα ενέργειας, μέχρι το 2050. Επιπλέον, για τα επιβατηγά πλοία και τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships) έχει τεθεί στόχος, έως την 1^η Ιανουαρίου του 2030, να μην εκπέμπουν ρύπους κατά την παραμονή τους στους λιμένες. Εξαιρούνται οι περιπτώσεις κατά τις οποίες τα πλοία αυτά παραμένουν στα λιμάνια για χρονικό διάστημα μικρότερο των δύο ωρών ή αναγκάζονται να μείνουν λόγω έκτακτης ανάγκης.

Οι ρύποι για τις παραπάνω φάσεις WtT και TtW υπολογίζονται σύμφωνα με τους τύπους:

$$\begin{aligned} & \text{Well – to – Tank GHG emissions [gCO}_2\text{eq]} \\ & = \sum_i^{nfuel} M_i \times CO_{2eq, WtT, i} \times LCVi + \sum_k^c E_k \times CO_{2eq, electricity, k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Tank – to – Wake GHG emissions [gCO}_2\text{eq]} \\ & = \sum_i^{nfuel} \sum_j^{m\ consumer} M_{ij} \times [(1 - C_{slip, j}) \times (CO_{2eq, TtW, i}) \\ & + (C_{slip, j} \times GWPC_{H4})] \end{aligned}$$

GHG emissions [g_{CO2eq}] = Well-to-Tank GHG emissions + Tank-to-Wake GHG emissions

Όπου, $CO_{2eq, TtW, i} = (C_{f, CO_2} \times GWP_{CO_2} + C_{f, CH_4} \times GWP_{CH_4} + C_{f, N_2O} \times GWP_{N_2O})_i$

Όπου,

- i: δείκτης που αναφέρεται στα διαφορετικά καύσιμα

- j : δείκτης που αναφέρεται στους διάφορους καταναλωτές. Καταναλωτής μπορεί να είναι η κύρια μηχανή, οι βοηθητικές ηλεκτρογεννήτριες κλπ.
- k : δείκτης που αναφέρεται στα σημεία σύνδεσης όπου παρέχεται η ηλεκτρική ενέργεια
- c : δείκτης που αναφέρεται στον αριθμό των σημείων σύνδεσης που σχετίζονται με την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας
- m : δείκτης που αναφέρεται στον αριθμό των καταναλωτών ενέργειας
- M_{ij} : η μάζα ενός συγκεκριμένου καυσίμου που καταναλώνεται από έναν καταναλωτή j (μετράται σε g)
- $CO_{2eq,WtT,i}$: οι ρύποι που εκπέμπονται κατά τη φάση WtT ενός καυσίμου ανά μονάδα ενέργειας, οι οποίοι έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με εγκεκριμένη μεθοδολογία (π.χ. RED II) (μετράται σε $g_{CO_{2eq}}/MJ$)
- $CO_{2eq,TtW,i}$: οι ρύποι που εκπέμπονται κατά τη φάση TtW ενός καυσίμου που καταναλώνεται από έναν καταναλωτή j (μετράται σε $g_{CO_{2eq}}/g_{FUEL}$)
- C_{f,CO_2} , C_{f,CH_4} , C_{f,N_2O} : συντελεστές ρύπων (Carbon Factors) για το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4) και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) (μετρώνται σε g_{GHG}/g_{FUEL}) αντίστοιχα
- LCV_i : η ελάχιστη θερμογόνο δύναμη (Lower Calorific Value) ενός καυσίμου (μετράται σε MJ/g_{FUEL})
- $C_{slip,j}$: διαρροή καυσίμου σε ποσοστό επί τις εκατό της μάζας του καυσίμου που καταναλώνεται από έναν καταναλωτή j
- GWP_{CO_2} , GWP_{CH_4} , GWP_{N_2O} : συντελεστές που δείχνουν τη θερμότητα που απορροφάται από την ατμόσφαιρα λόγω κάθε ενός ρύπου (Global Warming Potential) σε 100 χρόνια. Οι τιμές των συντελεστών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΡΥΠΟΣ	GWP
CO_2	1
CH_4	28
N_2O	265

Πίνακας 13: Τιμές συντελεστών GWP για κάθε ρύπο (IMO)

- E_k : η ηλεκτρική ενέργεια που προσφέρεται σε k σημεία σύνδεσης/φόρτισης του πλοίου (μετράται σε MJ έπειτα από μετατροπή από MWh)
- $CO_{2eq,electricity,k}$: οι ρύποι που σχετίζονται με την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο κατά τον ελλιμενισμό (μετράται σε CO_{2eq}/MJ) (IMO)

Επίσης, υπολογίζονται οι ρύποι ανά μονάδα ενέργειας σύμφωνα με τον τύπο:

$$GHG\ INDEX \left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \right] = \frac{WtT\ GHG\ emissions}{\sum_i^{nfuel} Mi \times LCVi + \sum_k^c Ek} + \frac{TtW\ GHG\ emissions}{\sum_i^{nfuel} Mi \times LCVi + \sum_k^c Ek}$$

Σύμφωνα με τον τύπο αυτόν καθορίζονται ποσοστιαία οι στόχοι μείωσης των ρύπων για κάθε έτος. Οι στόχοι που έχουν τεθεί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Έτος	Ποσοστιαία μείωση σε σχέση με το έτος αναφοράς
2020	Έτος αναφοράς
2025	-2%
2030	-6%
2035	-13%
2040	-26%
2045	-59%
2050	-75%

Πίνακας 14: Καθορισμένοι στόχοι μείωσης ρύπων ανά έτος (Williams M.)

Δηλαδή,

$$GHG\ TARGET\ (2025) = \frac{100 - 2}{100} \times GHG\ INDEX\ (2020) = 0,98 \times GHG\ INDEX\ (2020)$$

Κατόπιν, υπολογίζεται το Compliance Balance που αποτελεί το κριτήριο για το αν το πλοίο πληροί τις προϋποθέσεις, και κατά επέκταση, για το αν απαιτείται να επιβληθεί στην πλοιοκτήτρια εταιρία χρηματικό πρόστιμο. Το Compliance Balance υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

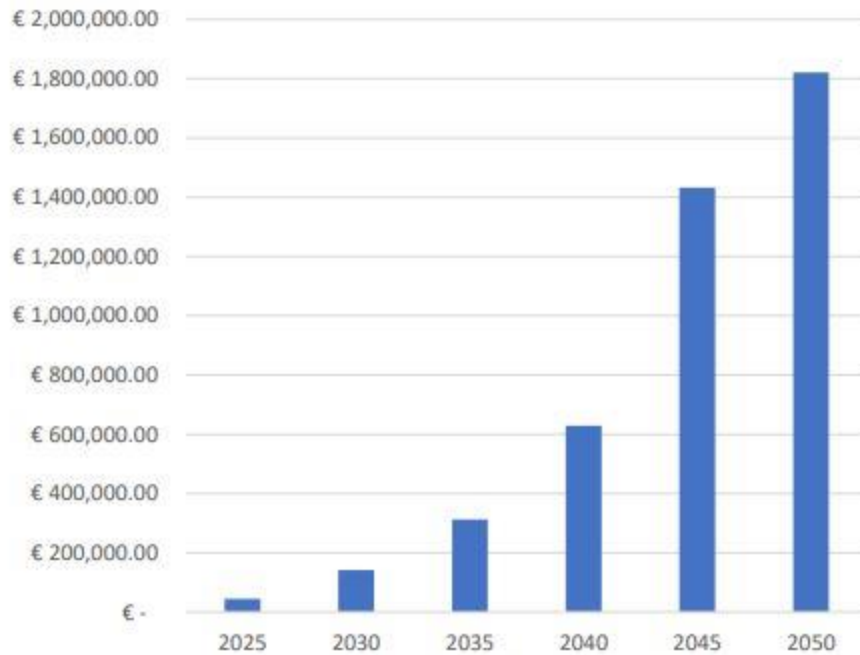
$$\begin{aligned}
 \text{Compliance Balance } \left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \right] \\
 = (GHG \text{ TARGET} - GHG \text{ ACTUAL}) \times \sum_i^{n_{fuel}} M_i \times LCV_i + \sum_k^c E_k
 \end{aligned}$$

Αν το Compliance Balance είναι αρνητικός αριθμός, δηλαδή αν οι ρύποι ανά μονάδα ενέργειας που παράγει ένα πλοίο σε ένα συγκεκριμένο έτος είναι περισσότεροι από αυτούς που έχουν καθοριστεί ως στόχος για το έτος αυτό και για το συγκεκριμένο πλοίο, τότε θεωρείται ότι το πλοίο δεν πληροί τις προϋποθέσεις και του επιβάλεται χρηματικό πρόστιμο (υπολογισμένο σε Ευρώ) που υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

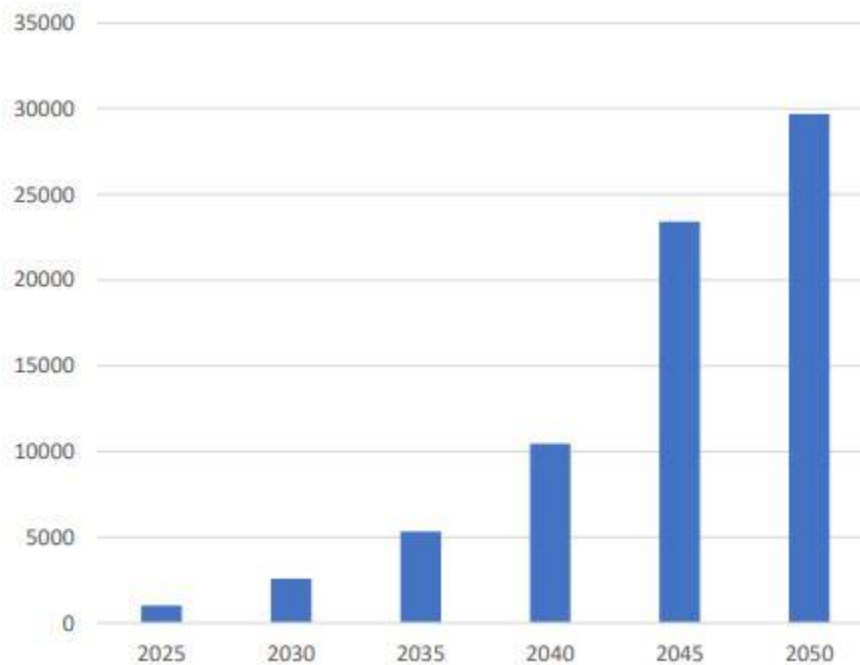
$$PENALTY [EUR] = \frac{\text{Compliance Balance}}{GHG \text{ ACTUAL}} \times (2,439 \times 10^{-5}) \times EUR2400$$

Σε αντίθετη περίπτωση που το Compliance Balance είναι θετικός αριθμός, οι ρύποι ανά μονάδα ενέργειας που παράγει το πλοίο βρίσκονται εντός επιτρεπτών ορίων και, κατά επέκταση, η πλοιοκτήτρια εταιρία δεν υποχρεούται να πληρώσει ποινή.

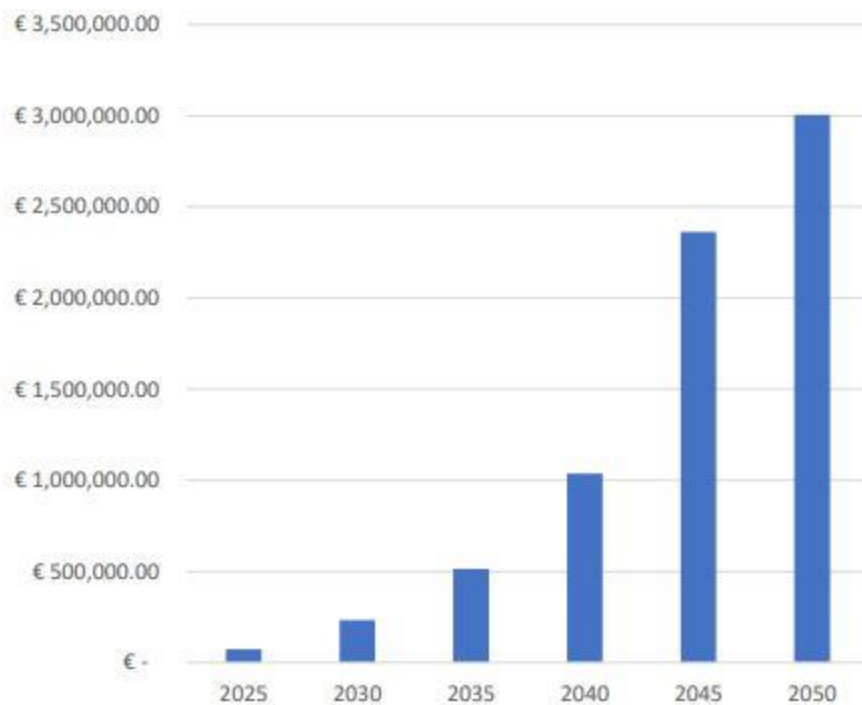
Ακολουθούν διαγράμματα που δείχνουν τις εκτιμώμενες μέσες χρηματικές ποινές, για όσα πλοία δε συμμορφώνονται με τον κανονισμό, ανά χρονιά για διάφορους τύπους πλοίων.



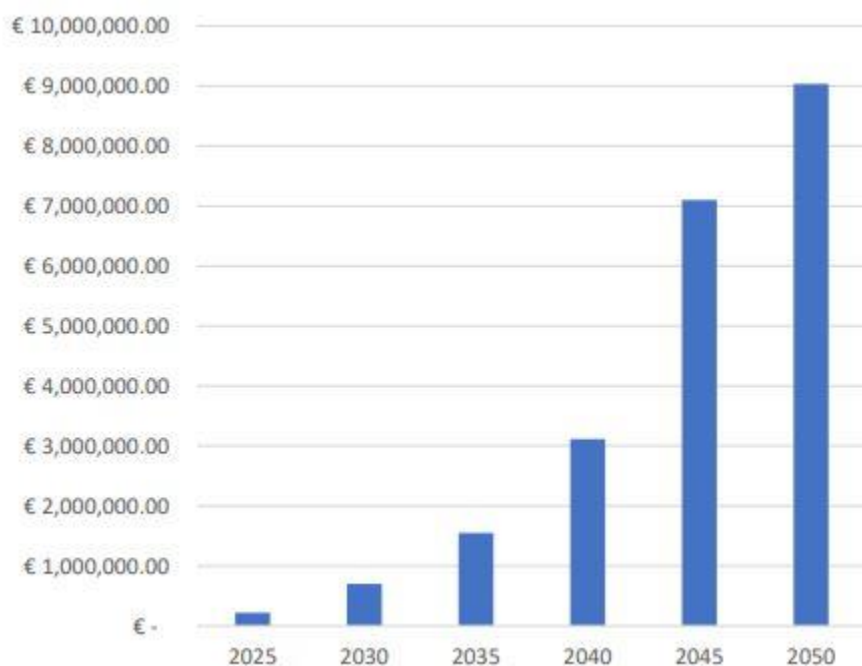
Διάγραμμα 9: Πιθανά μέσα χρηματικά πρόστιμα ανά χρονιά για όλα τα μη συμμορφούμενα πλοία (Williams M.)



Διάγραμμα 10: Πιθανά μέσα χρηματικά πρόστιμα ανά χρονιά για όλα τα μη συμμορφούμενα πλοία μεταφοράς ξυρού φορτίου χύδην (Bulk Carriers) (Williams M.)



Διάγραμμα 11: Πιθανά μέσα χρηματικά πρόστιμα ανά χρονιά για όλα τα μη συμμορφούμενα φορηγά πλοία (Tankers) (Williams M.)



Διάγραμμα 12: Πιθανά μέσα χρηματικά πρόστιμα ανά χρονιά για όλα τα μη συμμορφούμενα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Container Ships) (Williams M.)

Επιπρόσθετα του παραπάνω χρηματικού προστίμου έχει οριστεί και φόρος για τα είδη καυσίμου που χρησιμοποιούνται από το κάθε πλοίο, ο οποίος θα τεθεί σε ισχύ από το 2033. Ο φόρος αυτός είναι σημαντικά μικρότερος για τα «πράσινα» καύσιμα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Στόχος της «επιστράτευσής» του αποτελεί η δυνατόν ταχύτερη δυνατή απομάκρυνση από τα συμβατικά, ρυπογόνα καύσιμα και η στροφή στα εναλλακτικά καύσιμα, των οποίων ο αρνητικός αντίκτυπος στο περιβάλλον είναι σημαντικά μικρότερος. Με αυτόν τον τρόπο ενισχύεται συγχρόνως ο κανονισμός “FUEL EU”, αφού η χρήση «πράσινων» καυσίμων είναι ένα από τα διαθέσιμα μέσα για να επιτευχθούν οι στόχοι μείωσης των ρυπογόνων αερίων. Το ύψος των φόρων στα διάφορα είδη καυσίμων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα: (Williams M.)

FUEL	RATE BY 2033 (EUR/MJ)
MGO / HFO / VLSFO	0,0009
LNG / LPG / non-sustainable biogas	0,0009
Non-sustainable biofuel	0,01075
Sustainable biofuel	0,00045
Advanced biofuels / renewable from non-biological origin / low-carbon fuel	0,00045
Electricity	0,00015

Πίνακας 15: φόρος στα διαφορετικά είδη καυσίμου (Williams M.)

Στην τρέχουσα περίοδο, όταν γράφτηκε η εργασία, ο IMO δεν έχει προχωρήσει ακόμα ε θεσμοθέτηση φορολόγησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, αυτό, όπως διαφαίνεται από την πρόοδο των εργασιών στην περιβαλλοντική επιτροπή του IMO (EMPC), είναι πολύ πιθανό μέχρι το 2026 ο IMO να προχωρήσει σε επιπλέον μέτρα για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου με προκρινόμενο μέτρο αυτό της φορολόγησης άνθρακα (carbon tax). Τη δεδομένη χρονική στιγμή συγγραφής της εργασίας, έχουν υπάρξει αρκετές προτάσεις προς τον IMO με διάφορα σενάρια τιμολόγησης άνθρακα με προτεινόμενες τιμές από 5 έως 135 δολάρια ανά τόνο CO₂. (Κουρμπέλης Θ. 2022)

Κεφάλαιο 2.6: Διευκρινίσεις για καλύτερη κατανόηση του πρότζεκτ

Ακολουθούν ορισμένες διευκρινίσεις έτσι ώστε να γίνει ευκολότερη και καλύτερη η κατανόηση των αποτελεσμάτων αλλά και ολόκληρου του πρότζεκτ:

- Τα δεδομένα των πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν είναι η χωρητικότητά τους (Deadweight), τα ετήσια καύσιμα HFO, LFO και MGO που χρησιμοποιούν και η συνολική απόσταση που διανύουν μέσα σε έναν χρόνο λειτουργίας. Ωστόσο, τα δεδομένα αυτά αποτελούν απόρρητες πληροφορίες με αποτέλεσμα να μη μπορούν να δημοσιευτούν στην παρούσα εργασία. Έτσι, είναι περιττή και η δημοσίευση των αναλυτικών πράξεων που έχουν γίνει, αφού δεν είναι εύκολη η αποκωδικοποίησή τους δίχως τα δεδομένα τους, και, τελικά, παρουσιάζεται μόνο η ουσία της εργασίας, δηλαδή τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα.
- Όλοι οι υπολογισμοί αφορούν ένα έτος λειτουργίας του εκάστοτε πλοίου. Ακόμα και στο οικονομικό μέρος που γίνεται αναφορά σε περιόδους πολλών ετών, τα κόστη αναφέρονται σε κάθε έναν χρόνο της κάθε περιόδου.
- Υπάρχουν τρία διαφορετικά σενάρια στην περίπτωση του Cold Ironing τα οποία διαφέρουν ως προς το ποσοστό της συνολικής ετήσιας ενέργειας που προσφέρεται στο πλοίο κατά τον ελλιμενισμό του, κάτι το οποίο, συνήθως, εξαρτάται από το συνολικό χρόνο παραμονής ανά έτος στα λιμάνια. Το πιο συνηθισμένο ποσοστό παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στο 30% της συνολικής ενέργειας που προσφέρεται στο πλοίο από το MGO, μιας που αυτό είναι το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιείται από τις βοηθητικές μηχανές - γεννήτριες. Επίσης, μελετώνται και οι περιπτώσεις που το ποσοστό φτάνει στο 20% αλλά και στο 40%.
- Υπάρχουν τρία διαφορετικά σενάρια στην περίπτωση του LNG τα οποία διαφέρουν ως προς το ποσοστό του Methane Slip. Μελετάται η περίπτωση που το ποσοστό αυτό φτάνει στο 3,1% αλλά και οι περιπτώσεις που ανέρχεται στο 1,7% και 0,2%, όπου και αναμένεται να φτάσει με τη εξέλιξη και βελτίωση των κινητήρων.
- Η αναγωγή των καυσίμων από Ντίζελ σε οποιαδήποτε άλλο καύσιμο γίνεται μέσω της ενέργειας που προσφέρουν τα καύσιμα και συγκεκριμένα μέσω της θερμογόνου δύναμης (Net Calorific Value).
- Στις περιπτώσεις του LNG και των εναλλακτικών καυσίμων χρησιμοποιείται MGO ως πιλοτικό καύσιμο που προσδίδει μόλις το 1% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας του πλοίου έτσι ώστε να διευκολυνθεί η ανάφλεξη και η έναρξη λειτουργίας του εκάστοτε κινητήρα.
- Στο σενάριο του Βιο-Ντίζελ, το Βιο-Ντίζελ καλύπτει το 30% της ενέργειας που προσφέρει το HFO. Επίσης, το Βιο-Ντίζελ αποτελεί μείγμα με συστατικά MGO και Βιο-Ντίζελ σε ποσοστά 70% και 30% αντίστοιχα.

- Επισημαίνεται ότι τα εναλλακτικά καύσιμα ανήκουν στις «γκρι» κατηγορίες, δηλαδή αυτά που μέσω της παραγωγής τους εκπέμπουν αρκετούς ρύπους στο περιβάλλον, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα παρακάτω και συγκεκριμένα στους Wake-to-Tank ρύπους.
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν οι βαθμοί απόδοσης των κινητήρων, καθώς τα στοιχεία που είναι διαθέσιμα έως και σήμερα δεν επαρκούν για να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα η μεθανόλη.
- Ακολουθούν πίνακες με τις ιδιότητες των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν για να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί (όπου υπάρχει εύρος τιμών επιλέγεται ο μέσος όρος):

PATHWAY NAME	WtT		TtW				
	LCV	CO _{2eq} WtT	C _{f,CO2}	C _{f,CH4}	C _{f,N2O}	C _{SLIP}	CO _{2eq,TtW}
	MJ/g	gCO _{2eq} /MJ	gCO ₂ /gFUEL	gCH ₄ /gFUEL	gN _{2O} /gFUEL		
MGO	0,0427	14,9	3,206	0,00005	0,00018	0	3,2551
LFO	0,0412	13,2	3,151	0,00005	0,00018	0	3,2001
HFO	0,0402	9,6 – 14,1	3,114	0,00005	0,00018	0	3,1631
BIO-DIESEL	0,0372	-26,1	2,834	0,00005	0,00018	0	2,8831
METHANOL	0,0199	31,3	1,375	0,00005	0,00018	0	1,4241
HYDROGEN	0,12	132	0	0	0	0	0
AMMONIA	0,0186	121	0	0	0	0	0
LNG	0,048	18,1	2,75	0	0,00011	3,1% 1,7% 0,2%	2,77915

Πίνακας 16: Ιδιότητες καυσίμων (IMO)

PATHWAY NAME	CARBON CONTENT	S _F	Net Calorific Value		
			MJ / Kg	MWh / t	MJ / g
MGO	0,8744	1	42,7	11,8611206	0,0427
LFO	0,8594	1	40,6	11,2777868	0,0406
HFO	0,8493	1	42	11,666676	0,042
BIO-DIESEL	-	1	27	7,500006	0,027
METHANOL	0,375	1	19,9	5,5277822	0,0199
HYDROGEN	0	1	120	33,33336	0,12
AMMONIA	0	1	18,6	5,1666708	0,0186
LNG	0,75	1	48	13,333344	0,048

Πίνακας 17: Ιδιότητες καυσίμων (IMO)

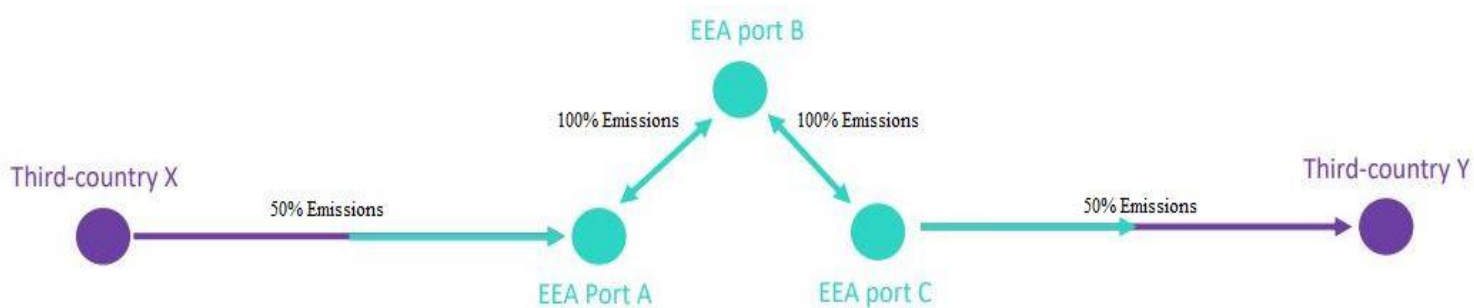
CO _{2eq,electricity} [gCO _{2eq} / MJ] (2020)	106,3
CO _{2eq,electricity} [gCO _{2eq} / MJ] (2030)	72
CO _{2eq,electricity} [gCO _{2eq} / MJ] (2050)	0

Πίνακας 18: Ιδιότητες ηλεκτρισμού (IMO)

GWP _{CO2}	1
GWP _{CH4}	28
GWP _{N2O}	265

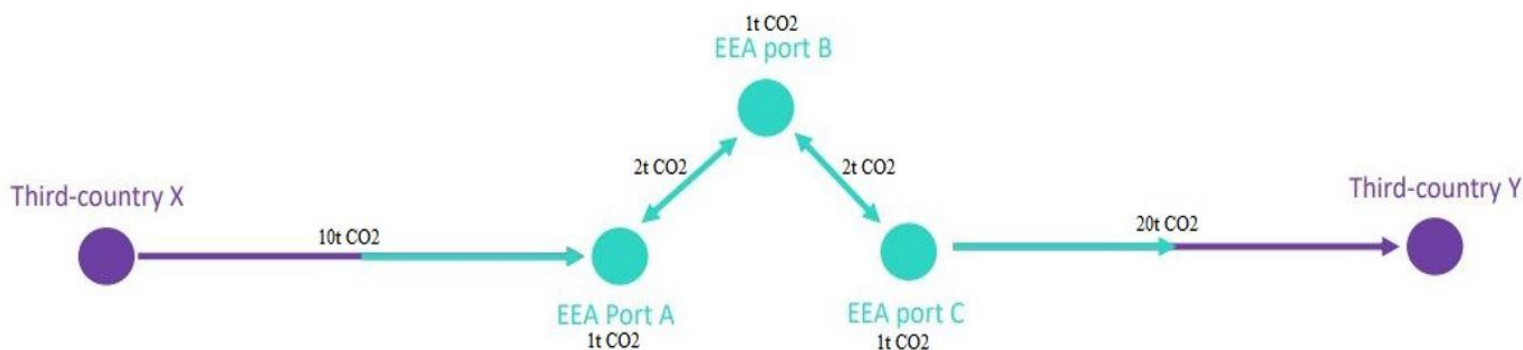
Πίνακας 19: Global-Warming Potential (IMO)

- Ο φόρος επί των παραγόμενων ρύπων «EU ETS» υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:
 $Penalty_{EU\ ETS} = 100\$ (\text{Carbon Price}) * 20\% * TtW\ Emissions$



Διάγραμμα 13: Επεξήγηση φόρου EU ETS

Ακολουθεί παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση:



Διάγραμμα 14: Παράδειγμα επεξήγησης φόρου EU ETS

Έστω ότι ένα πλοίο κάνει την παραπάνω διαδρομή και στην πορεία του εκπέμπει τους αναγραφόμενους τόνους CO₂ (10t, 2t, 2t και 20t εν πλω και 1t μέσα σε κάθε λιμάνι). Τότε, ο φόρος EU ETS υπολογίζεται με τα παρακάτω βήματα:

$$10t * 0,5 + 1t * 1 + 2t * 1 + 1t * 1 + 2t * 1 + 1t * 1 + 20t * 0,5 = 22t$$

$$EU ETS Penalty_{2023} = 20\% * 22t = 4,4t$$

$$Penalty_{EU ETS} = 4,4t * Carbon Price = 4,4t * 100\$/t = 440 \$$$

- Τα κόστη απόκτησης των καυσίμων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

MGO	683,117 \$/t	601,14296 €/t
LFO	470,5208 \$/t	414,058 €/t
HFO	674,92 \$/t	593,93 €/t
BIO-DIESEL	907,194 \$/t	798,33 €/t
METHANOL	870 \$/t	765,6 €/t
HYDROGEN	6000 \$/t	5280 €/t
	2000 \$/t (Προσδοκώμενο πράσινο H ₂)	1760 €/t (Προσδοκώμενο πράσινο H ₂)
AMMONIA	1100 \$/t	968 €/t
LNG	475 \$/t	418 €/t

Πίνακας 20: Κόστη απόκτησης καυσίμων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται και η χονδρική τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος ανά kWh, οι τιμές που προσδοκούνται ότι μπορούν να επιτευχθούν μέσα από συμφωνίες και ευνοϊκά μέτρα καθώς και μία μηδενική τιμή απόκτησης ηλεκτρικού ρεύματος για να γίνει η μελέτη πιο ολοκληρωμένη:

Electricity per kWh	
0,07 \$	0,06 €
0,05 \$	0,04 €
0,03 \$	0,02 €
0 \$	0 €

Πίνακας 21: Κόστη ηλεκτρικού ρεύματος

- Τα δολάρια που αναφέρονται στην εργασία είναι αμερικάνικα (USD) και η ισοτιμία με το ευρώ είναι: 1 USD = 0,88 Euro την ημέρα που έγιναν οι υπολογισμοί.
- Στους υπολογισμούς του οικονομικού σκέλους της εργασίας έχουν ληφθεί υπόψιν και συγκρίνονται μόνο τα λειτουργικά έξοδα κάθε περίπτωσης (OPEX, OPerating Expense), ενώ δεν λαμβάνονται υπόψιν τα έξοδα επένδυσης (CAPEX, CAPital Expenditures) που αφορούν την εγκατάσταση ή και μετατροπής των υπάρχοντων κινητήρων και

κατάλληλων συστημάτων. Για τα τελευταία έξοδα αναμένονται ευνοϊκά μέτρα απόκτησης και επιδοτήσης προκειμένου οι πλοιοκτήτριες εταιρίες να ενθαρυνθούν ώστε να προβούν στις επενδύσεις αυτές.

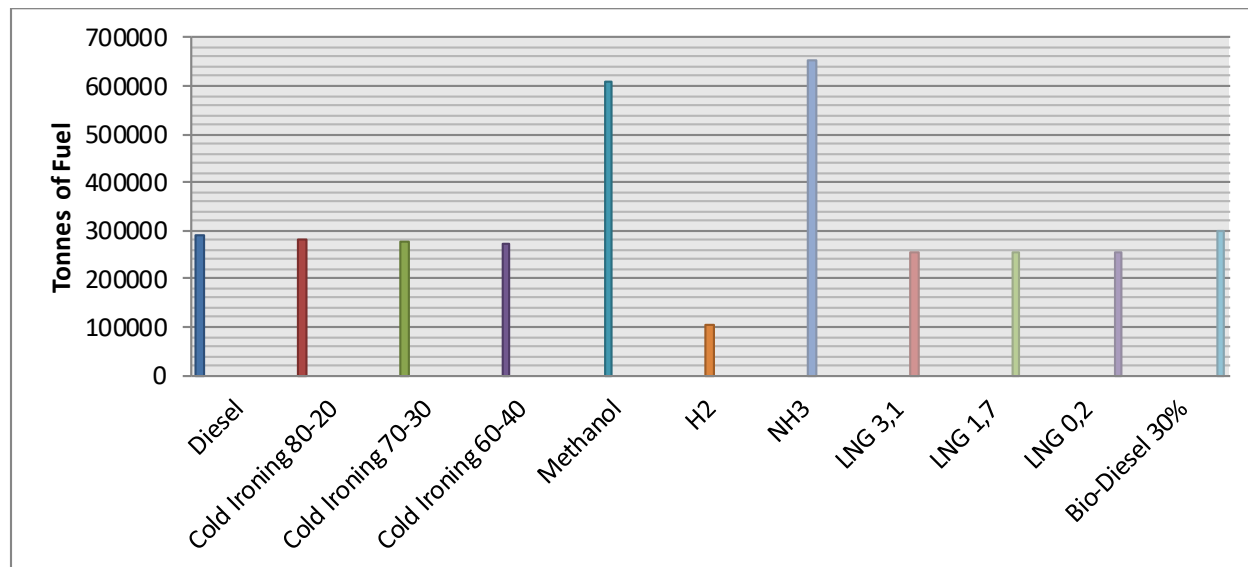
- Οι υπολογισμοί του οικονομικού σκέλους της εργασίας έγιναν για συνθήκες ομαλότητας. Την χρονική στιγμή συγγραφής της εργασίας διεξάγεται ο πόλεμος μεταξύ της Ουκρανίας και της Ρωσίας, πόλεμος ο οποίος έχει επηρεάσει σημαντικά διάφορους παράγοντες και κατά επέκταση έχει επιπτώσεις στην αγορά και την οικονομία. Διακυμάνσεις, λοιπόν, στις επηρεασμένες τιμές ορισμένων καυσίμων, όπως του LNG, δεν έχουν ληφθεί υπόψη.

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ / ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κεφάλαιο 1: Παράθεση και επεξήγηση αποτελεσμάτων

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που έχουν πραγματοποιηθεί. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων, ενώ αναφέρονται, αρχικά, σε όλο το στόλο των 45 bulk carriers.

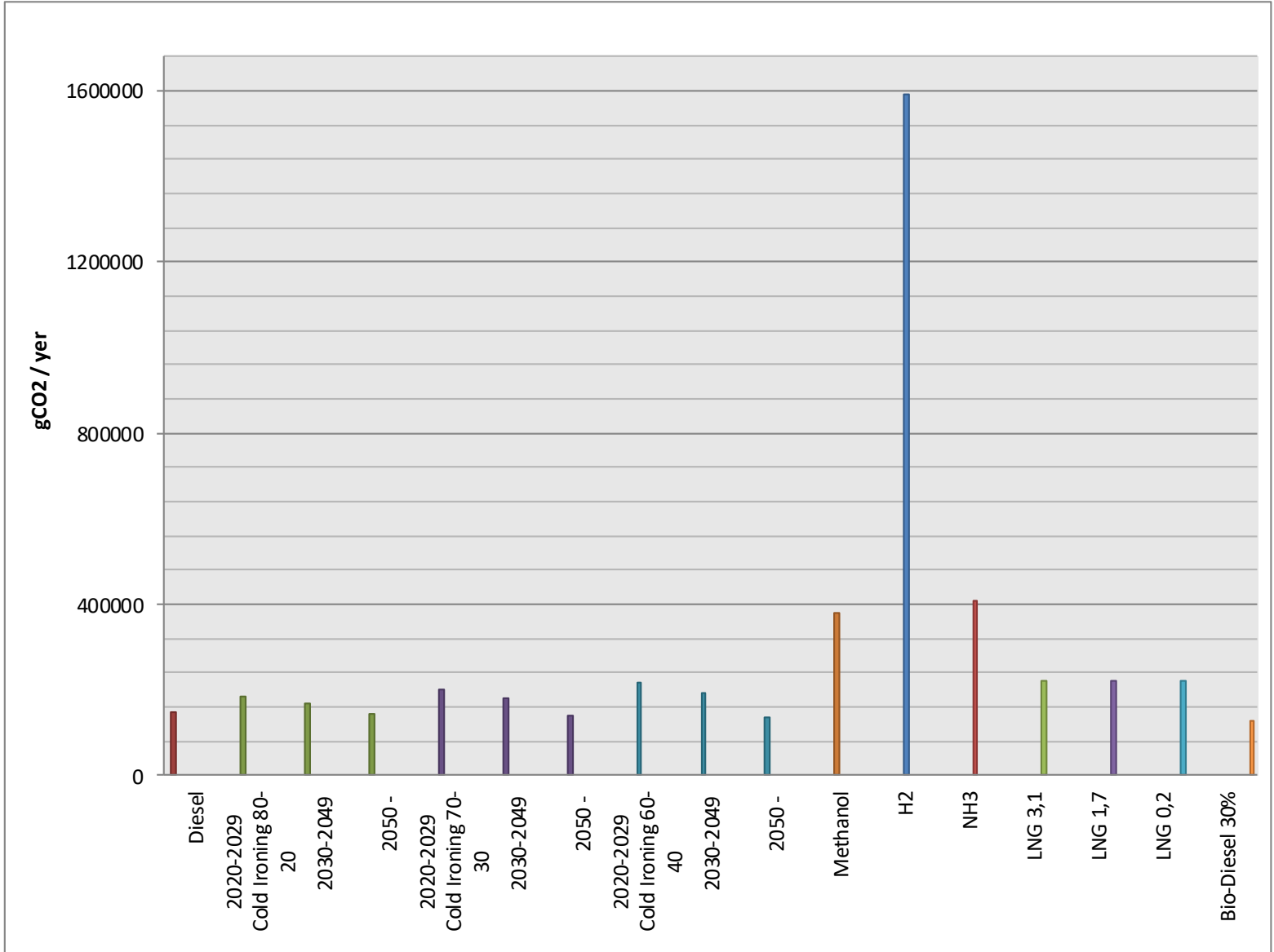
- Τόνοι καυσίμου:



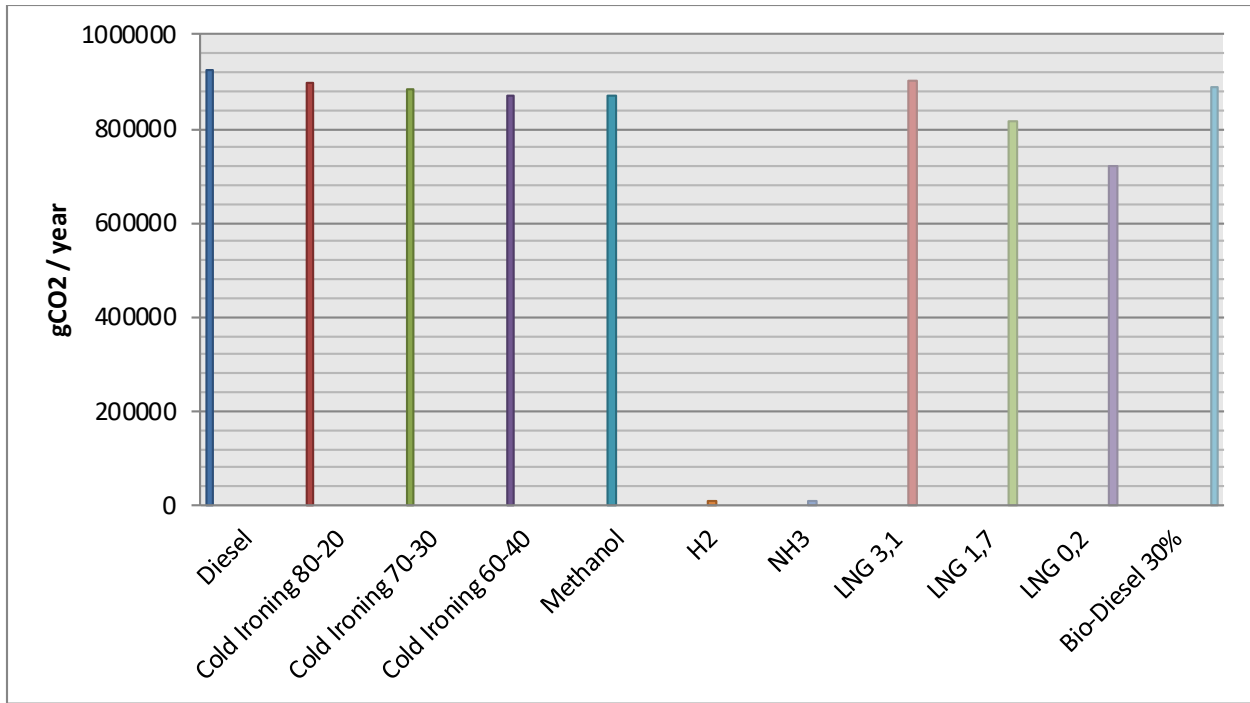
Διάγραμμα 15: Ετήσιοι τόνοι χρησιμοποιημένου καυσίμου ανά σενάριο

Λόγω της θερμογόνου δύναμης, για να ληφθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας για την ικανοποίηση των αναγκών του στόλου στις περιπτώσεις της μεθανόλης και της αμμωνίας απαιτείται σχεδόν διπλάσια ποσότητα καυσίμου από ότι στην περίπτωση των συμβατικών καυσίμων, συγκεκριμένα 209,28% και 223,84% των συμβατικών καυσίμων αντίστοιχα. Το βιοντίζελ απαιτεί σχεδόν ίση ποσότητα (λίγο παραπάνω από 6000 περισσότερους τόνους), ενώ το LNG ελαφρώς μικρότερη ποσότητα (περίπου 36800 λιγότερους τόνους). Τέλος, στην περίπτωση του υδρογόνου χρειάζεται λιγότερη ποσότητα καυσίμου από την αντίστοιχη μισή των συμβατικών καυσίμων (μόλις 35,52%).

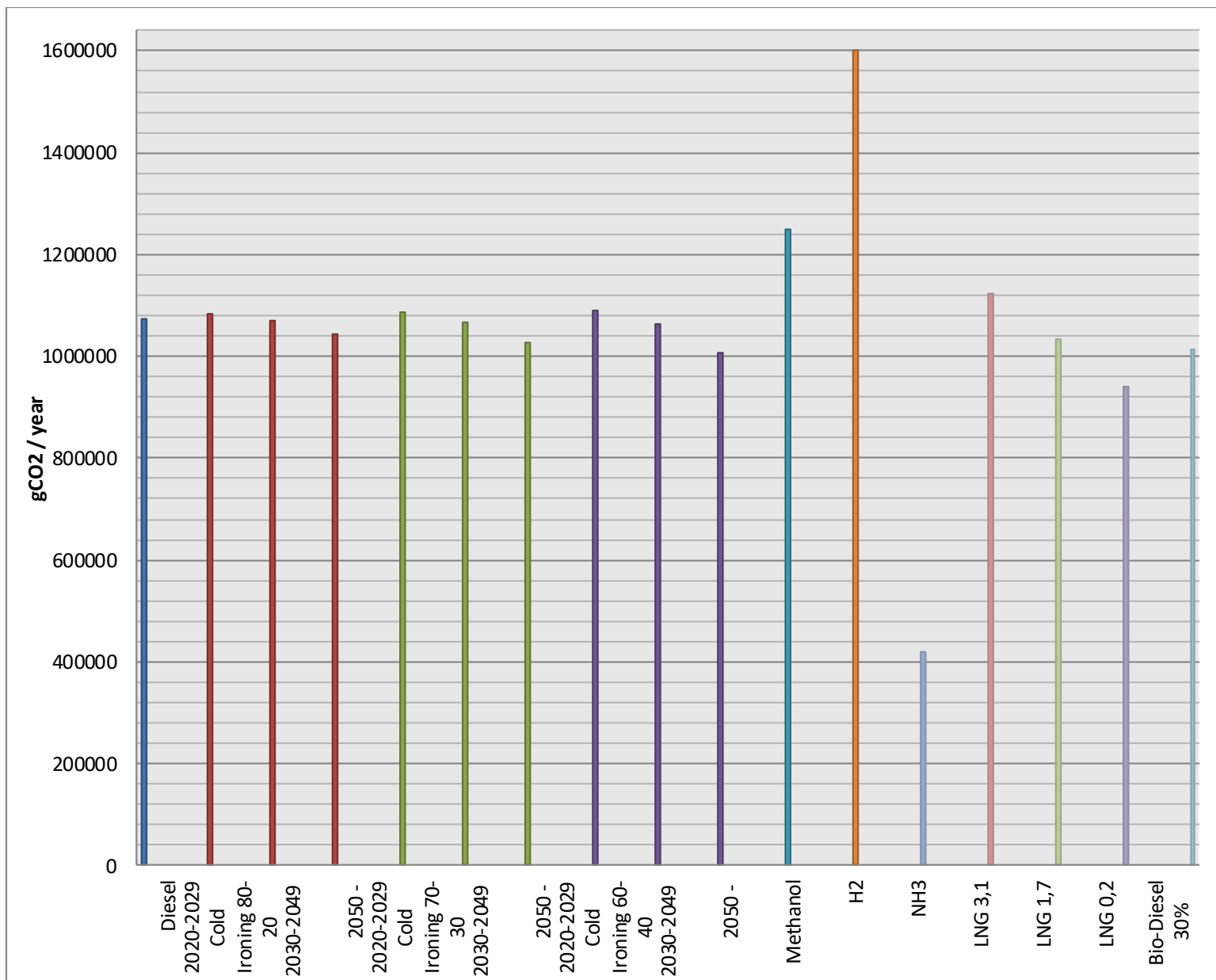
- Εκπομπές ρύπων:



Διάγραμμα 16: Εκπομπές ρύπων CO₂ ανά έτος ανά καύσιμο κατά την WtT φάση



Διάγραμμα 17: Εκπομπές ρύπων CO₂ ανά έτος ανά καύσιμο κατά την TtW φάση



Διάγραμμα 18: Εκπομπές ρύπων CO₂ ανά έτος ανά καύσιμο κατά την WtW φάση

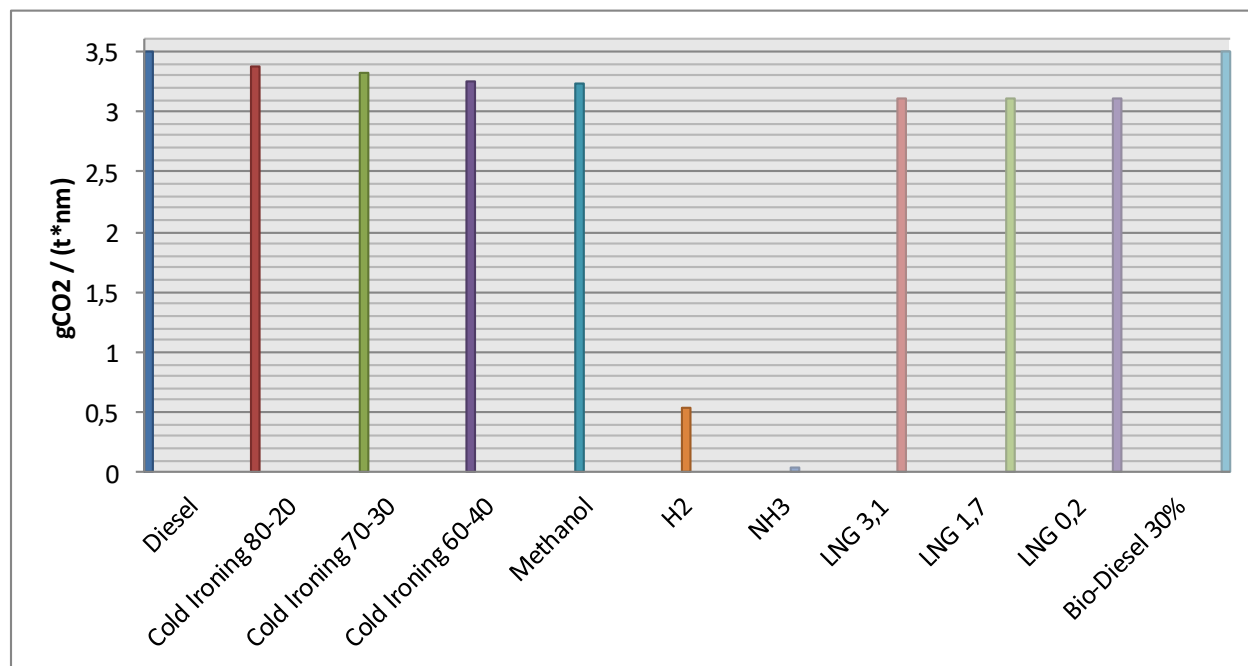
Στην WtT φάση παρατηρείται ότι όλα τα εναλλακτικά καύσιμα ανήκουν στις «γκρι» κατηγορίες αφού η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπουν κατά την παραγωγή τους είναι σημαντική. Όπως φαίνεται από το αντίστοιχο διάγραμμα, στη συγκεκριμένη φάση το υδρογόνο αναδεικνύεται «νικητής» εκπέμποντας περίπου 10 φορές περισσότερους τόνους διοξειδίου του άνθρακα από ότι το ντίζελ, ενώ ακολουθούν η μεθανόλη και η αμμωνία στην παραγωγή των οποίων εκπέμπεται περίπου διπλάσια ποσότητα διοξειδίου. Το LNG παράγει

περίπου 71100 περισσότερους ρύπους ενώ τα μοναδικά θετικά αποτελέσματα έρχονται από το βιοντίζελ και το cold ironing, αλλά μετά το 2050.

Στην TtW φάση όλα τα καύσιμα παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα, σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, ενώ ξεχωρίζουν το υδρογόνο και η αμμωνία που η αρνητική τους συμβολή στο περιβάλλον είναι σχεδόν αρνητική (δεν εκπέμπονται ούτε 10000 τόνοι διοξειδίου του άνθρακα).

Στην WtW φάση γίνεται ξεκάθαρο ότι το πιο ρυπογόνο καύσιμο είναι το υδρογόνο εκπέμποντας, λόγω της WtT φάσης όπως εξηγήθηκε παραπάνω, συνολικά 1,5 φορές το διοξείδιο του άνθρακα των συμβατικών καυσίμων. Δεύτερο πιο επιβλαβές για το περιβάλλον έρχεται η μεθανόλη εκπέμποντας 177000 περισσότερους τόνους από ότι το ντίζελ. Θετικές αποδεικνύονται οι περιπτώσεις του cold ironing, μετά το 2030, του LNG, με methane slip ίσο με 1,7%, και του βιοντίζελ, αλλά η απόκλιση δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Η βέλτιστη για την προστασία του περιβάλλοντος λύση φαίνεται να είναι η αμμωνία που το διοξείδιο που εκπέμπει αποτελεί το 39,03% του εκπεμπόμενου διοξειδίου από τα συμβατικά καύσιμα, ενώ θετική μπορεί να θεωρηθεί και η περίπτωση του LNG με methane slip 0,2% με αντίστοιχο ποσοστό 87% του ντίζελ.

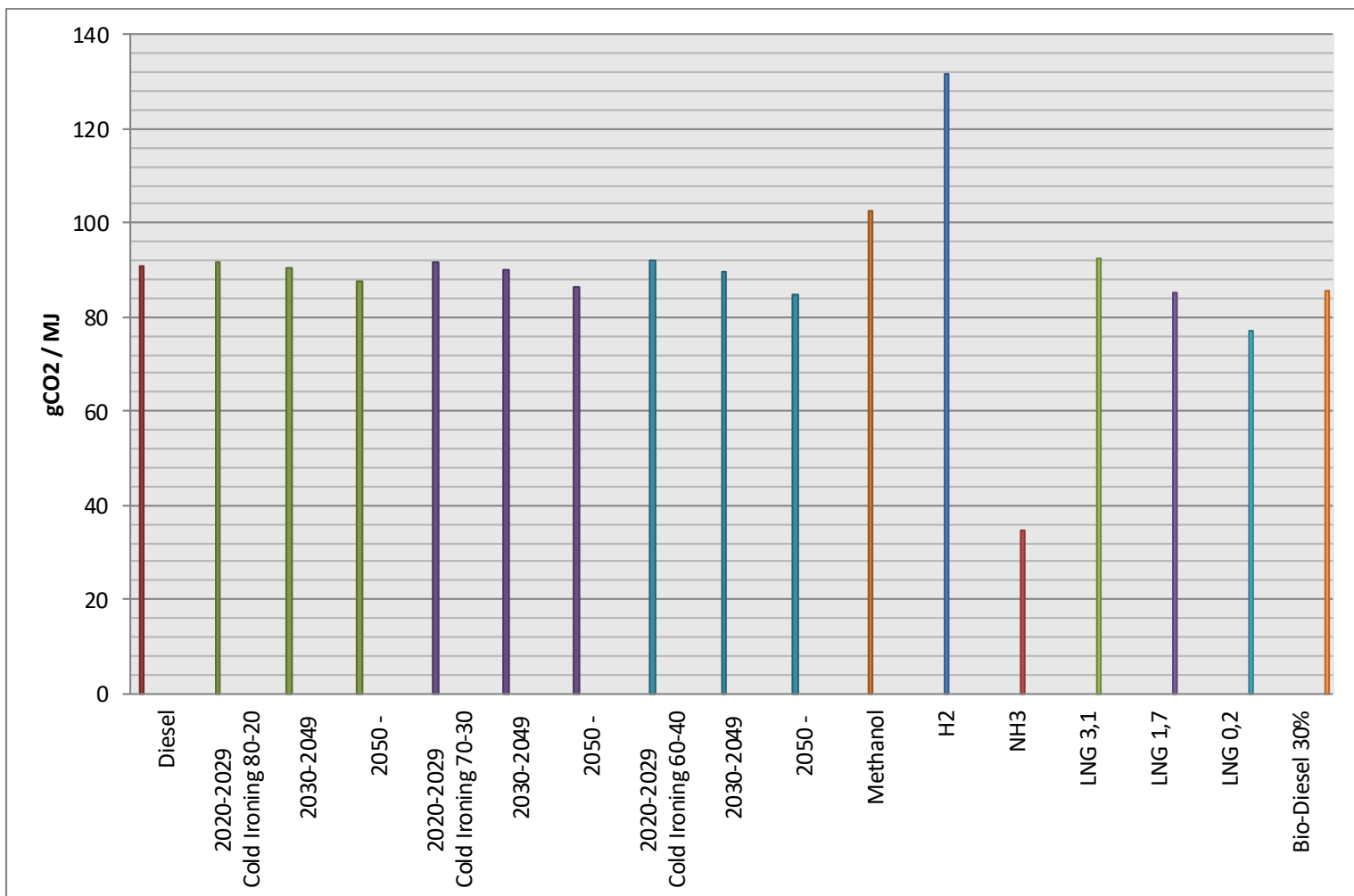
- Carbon Intensity Indicator:



Διάγραμμα 19: Δείκτης CI ανά καύσιμο

Η τιμή του δείκτη για την αμμωνία είναι σχεδόν μηδενική ($0,035 \text{ g}_{\text{CO}_2} / \text{t} \cdot \text{mm}$), ενώ η τιμή για το υδρογόνο είναι εξαιρετικά χαμηλή ($0,529 \text{ g}_{\text{CO}_2} / \text{t} \cdot \text{mm}$). Σε κάθε άλλη περίπτωση οι δείκτης CII έχει τιμές χαμηλότερες από αυτή του ντίζελ ($3,38 - 3,11$ έναντι του $4,495$), ενώ στο σενάριο του βιοντίζελ ο δείκτης λαμβάνει ελαφρώς αυξημένη τιμή ($4,499$).

- Average Compliance Index (Fuel EU Maritime)

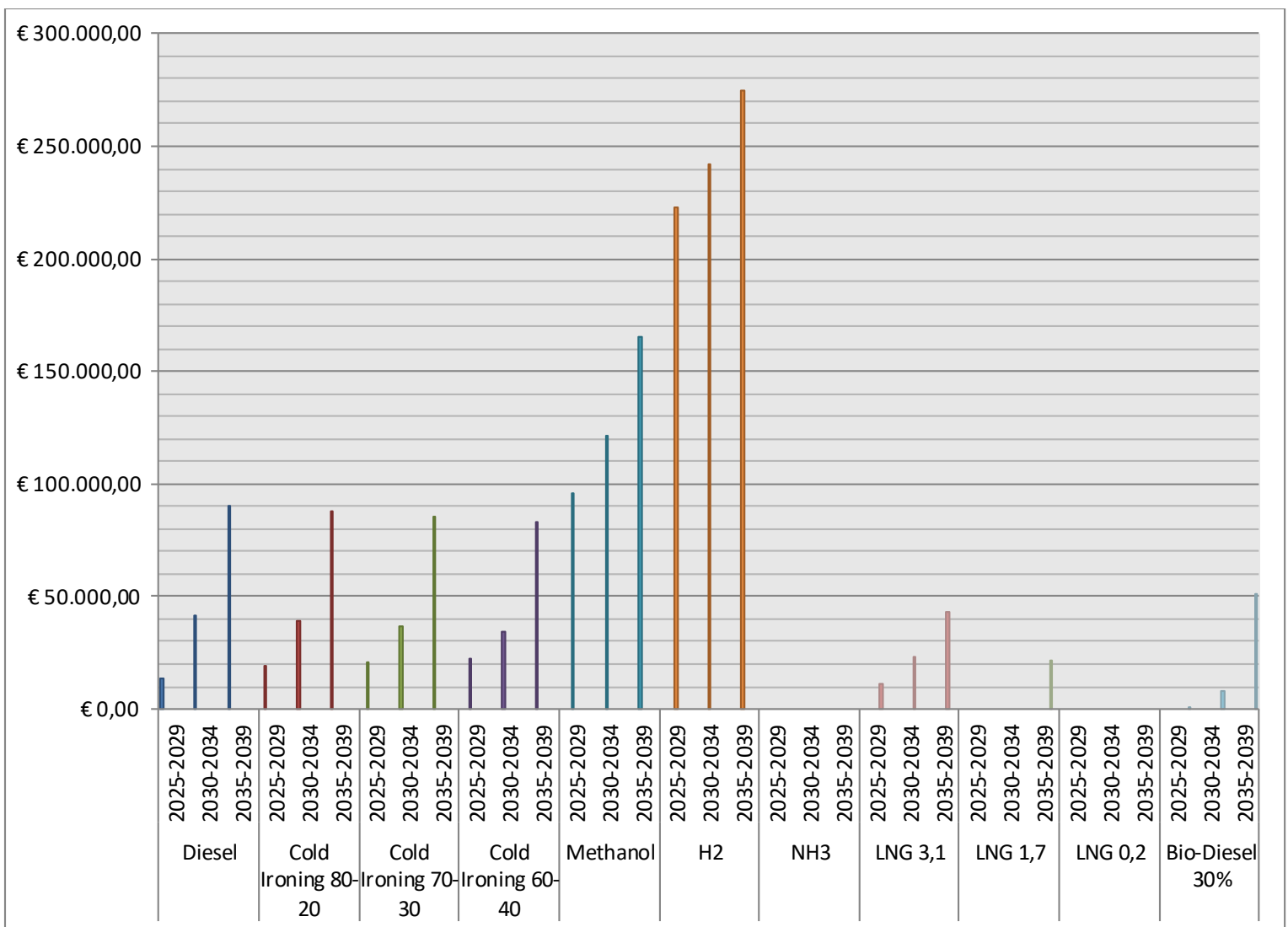


Διάγραμμα 20: Μέσος όρος δείκτη compliance index ανά καύσιμο

Οι περιπτώσεις του cold ironing, μετά το 2030, του LNG με methane slip 1,7% και το βιοντίζελ παρουσιάζουν ελαφρώς μειωμένες τιμές με απόκλιση έως και $6,10 \text{ g}_{\text{CO}_2} / \text{MJ}$, ενώ το cold ironing, για το διάστημα 2020 – 2029, και το LNG με methane slip 3,1% εμφανίζουν

ελαφρώς αυξημένες τιμές με απόκλιση έως και 1,58 g_{CO2} / MJ. Σημαντική αρνητική απόκλιση παρουσιάζουν η μεθανόλη και το υδρογόνο με τιμές 102,75 g_{CO2} / MJ και 131,79 g_{CO2} / MJ και απόκλιση 12,04 g_{CO2} / MJ και 40,89 g_{CO2} / MJ. Στον αντίποδα, σημαντική θετική απόκλιση παρουσιάζει το LNG με methane slip 0,2% με την τιμή του να φτάνει τα 77,19 g_{CO2} / MJ και απόκλιση 13,51 g_{CO2} / MJ από τα συμβατικά καύσιμα. Τέλος, θετική εξαίρεση αποτελεί η αμμωνία που η μέση τιμή του compliance index φτάνει μόλις τα 33,44 g_{CO2} / MJ και αποκλίνει από το ντίζελ κατά 56,26 g_{CO2} / MJ.

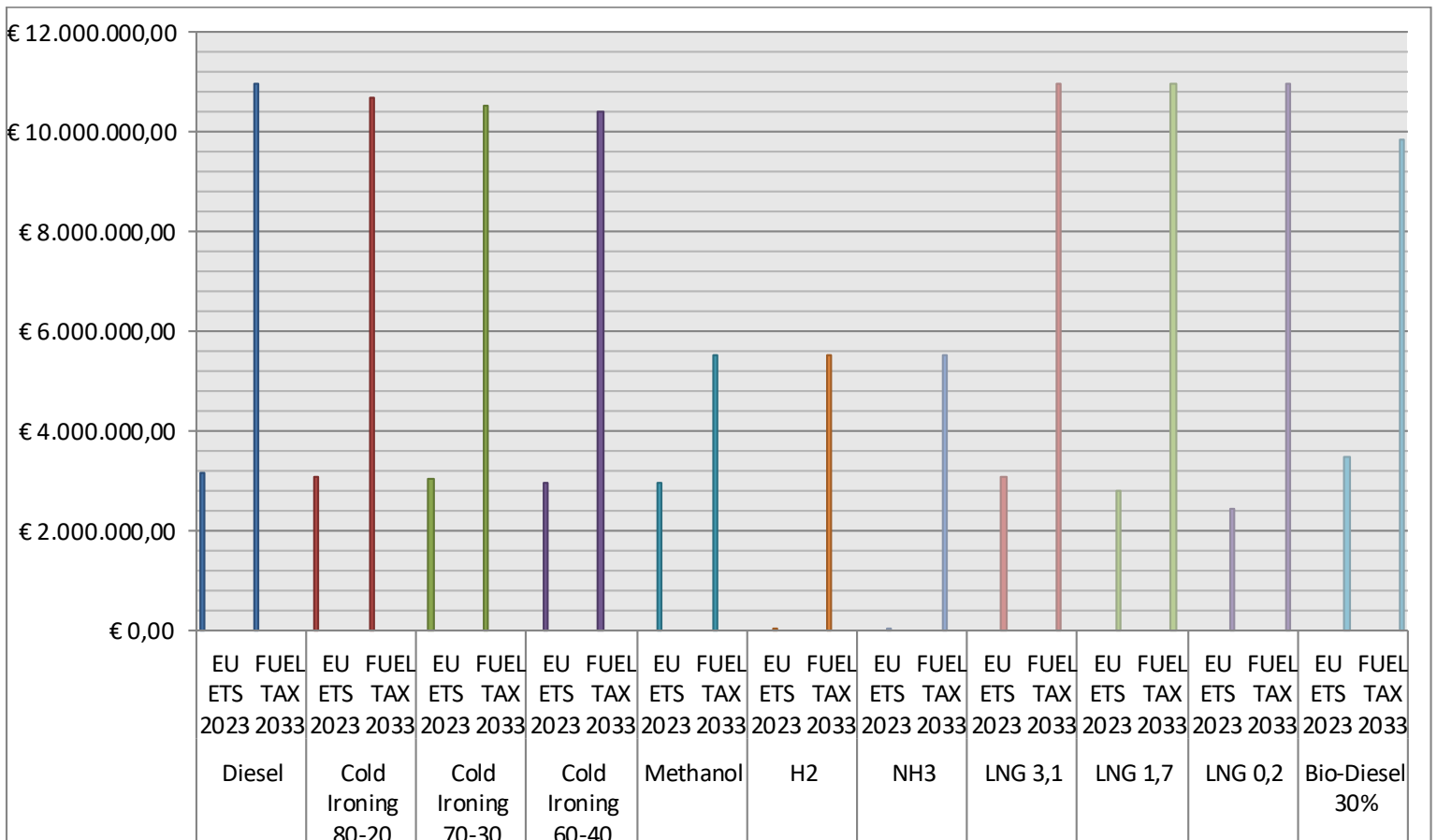
- Penalties (Fuel EU Maritime)



Διάγραμμα 21: Χρηματικά πρόστιμα λόγω μη συμμόρφωσης με τον κανονισμό Fuel EU Maritime ανά στόλο ανά έτος

Εντός των ορίων που ορίζει ο κανονισμός Fuel EU Maritime βρίσκονται η αμμωνία και το LNG με methane slip 0,2%, ενώ το LNG με methane slip 1,7% βρίσκεται εντός των ορίων αυτών έως και το 2034, πράγμα που σημαίνει ότι το αντίστοιχο χρηματικό πρόστιμο είναι μηδενικό. Το cold ironing κυμαίνεται κοντά στα συμβατικά καύσιμα ναυτιλίας. Πιο συγκεκριμένα, τα χρηματικά πρόστιμα είναι ελαφρώς αυξημένα για την χρονική περίοδο 2025 – 2029, ενώ είναι ελαφρώς μειωμένα μετά το 2030. Στην ίδια κατάσταση βρίσκεται και το LNG με methane slip 3,1%, με τα χρηματικά πρόστιμα να είναι σταθερά μειωμένα σε σύγκριση με το ντίζελ. Τέλος, αρνητικά είναι τα αποτελέσματα για τη μεθανόλη και το υδρογόνο, λόγω του πολύ αυξημένου δείκτη Compliance Index όπως φαίνεται στο προηγούμενο διάγραμμα. Η πρώτη ακολουθείται από ετήσιο χρηματικό πρόστιμο τριπλάσιο από αυτό του ντίζελ και το υδρογόνο συναντά χρηματικό πρόστιμο μεγαλύτερο από 222000 €, ενώ την περίοδο 2035 – 2039 το πρόστιμο ξεπερνά τις 275000 €.

- Φορολογία

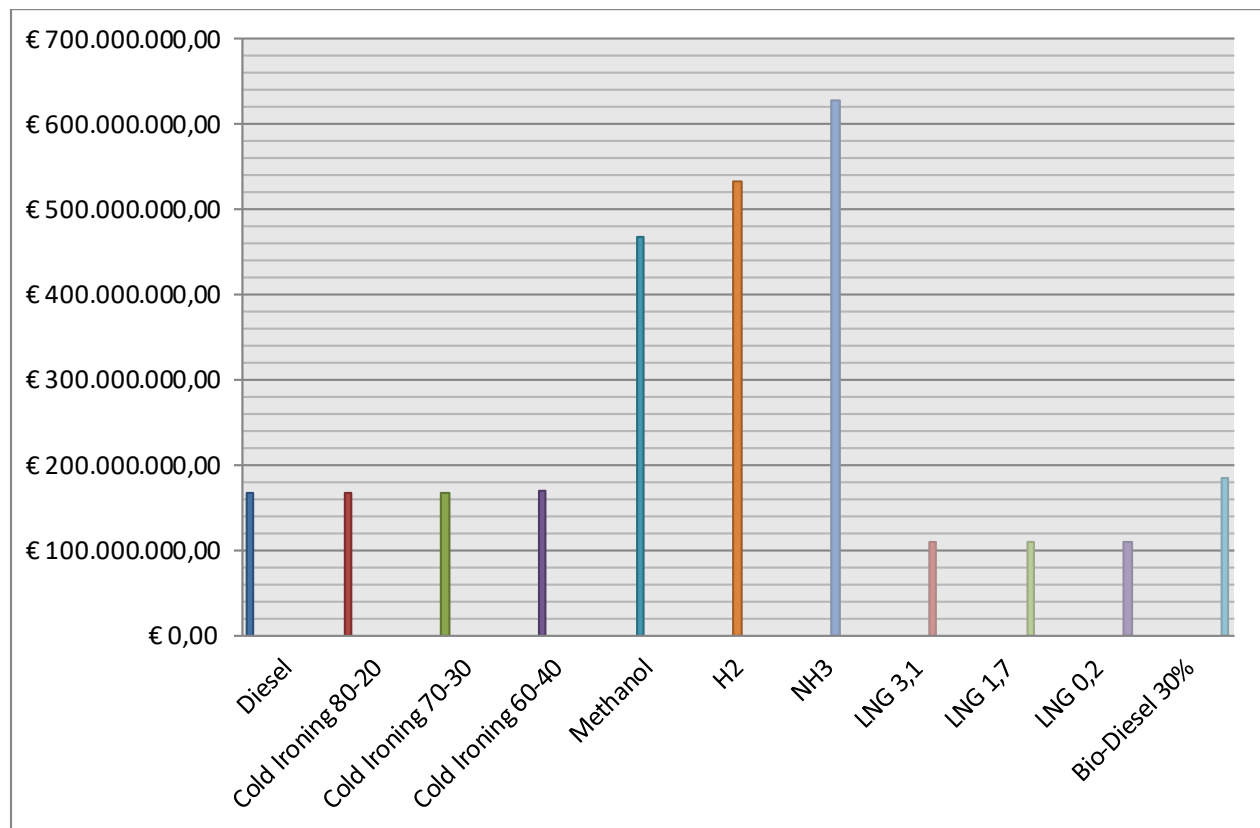


Διάγραμμα 22: Ετήσια φορολογία ανά στόλο α) λόγω των εκπομπών άνθρακα (carbon tax) β) λόγω του ίδιου του καυσίμου

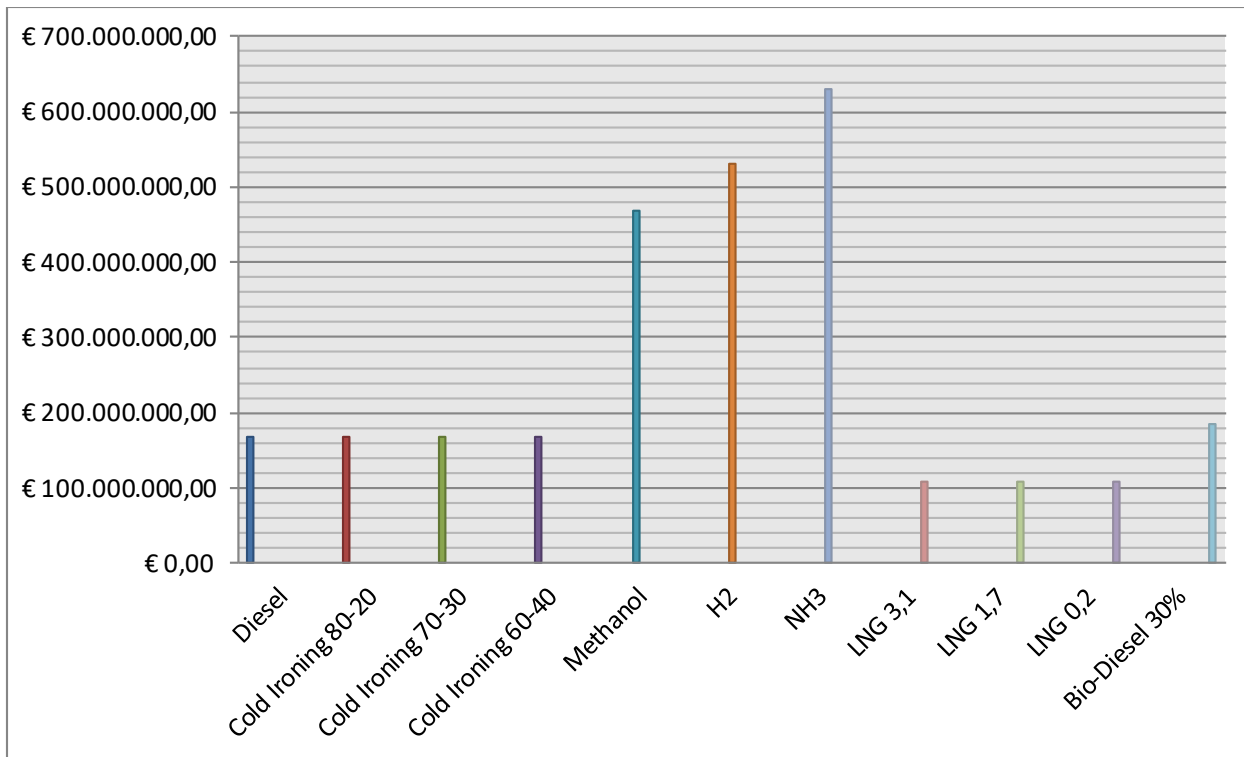
Ο σχολιασμός στην φορολόγηση άνθρακα είναι αντίστοιχος με αυτόν των εκπομπών ρύπων στην TtW φάση. Πολύ χαμηλά κυμαίνονται οι φόροι για το υδρογόνο και την αμμωνία, και, με εξαίρεση το βιοντίζελ που είναι κατά 303000 € πιο ψηλά, όλα τα υπόλοιπα καύσιμα ακολουθούνται από φόρους ελαφρώς χαμηλότερους από αυτούς του ντίζελ (3155433,79 €). Σημαντική είναι η απόκλιση του LNG με methane slip 1,7% και 0,2% που η ετήσια φορολογία τους λόγω των εκπομπών άνθρακα είναι μειωμένη κατά 377740,09 € και 701586,17 € αντίστοιχα.

Η φορολόγηση στο είδος του καυσίμου, όπως εξηγήθηκε και στο δεύτερο μέρος της εργασίας, χρησιμοποιείται ως κίνητρο έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν περισσότερο τα εναλλακτικά καύσιμα. Έτσι, το LNG έχει την ίδια φορολογία με το ντίζελ (10957150,97 €), μειωμένη κατά περίπου 300000 – 600000 € είναι στην περίπτωση του cold ironing και στην περίπτωση του βιοντίζελ είναι μειωμένη περίπου κατά 1100000 €. Προφανώς, τα εναλλακτικά καύσιμα παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη μείωση σε αυτήν την φορολόγηση, μείωση σχεδόν κατά το ήμισυ και συγκεκριμένα κατά 5423789,73 €.

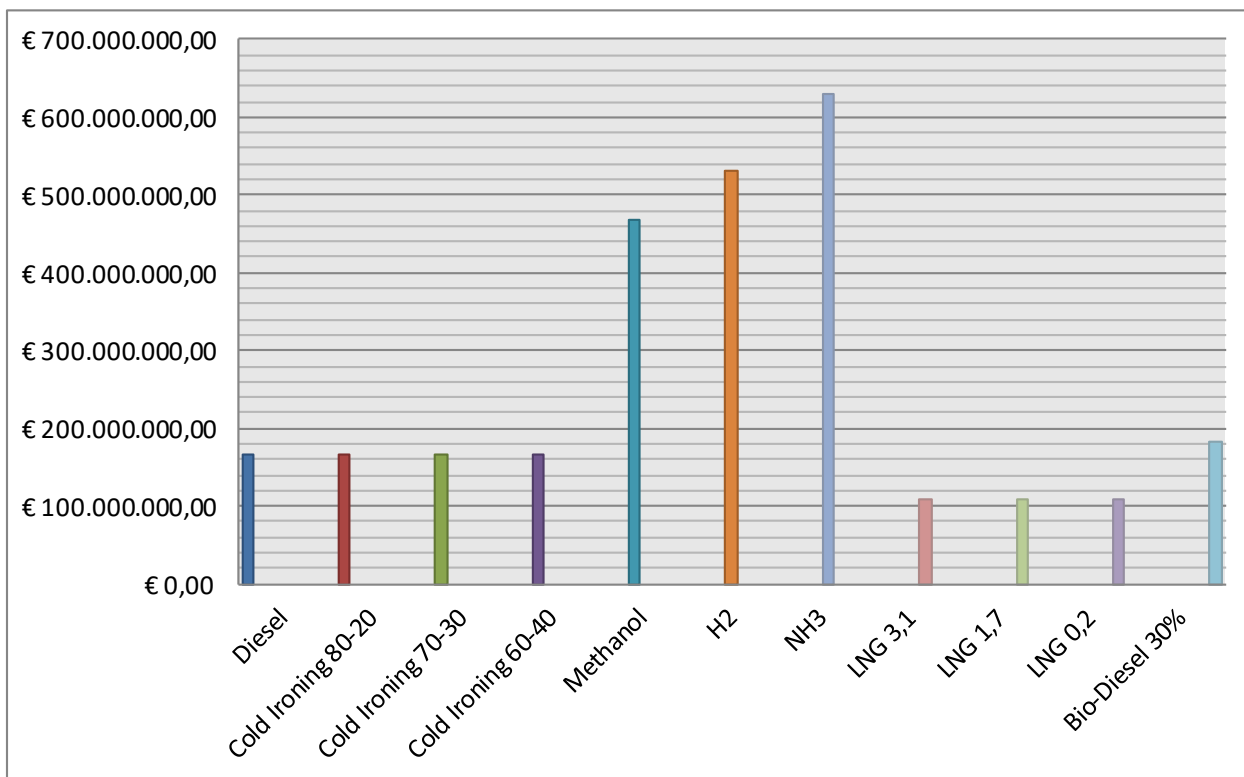
- Συνολικά κόστη λειτουργίας



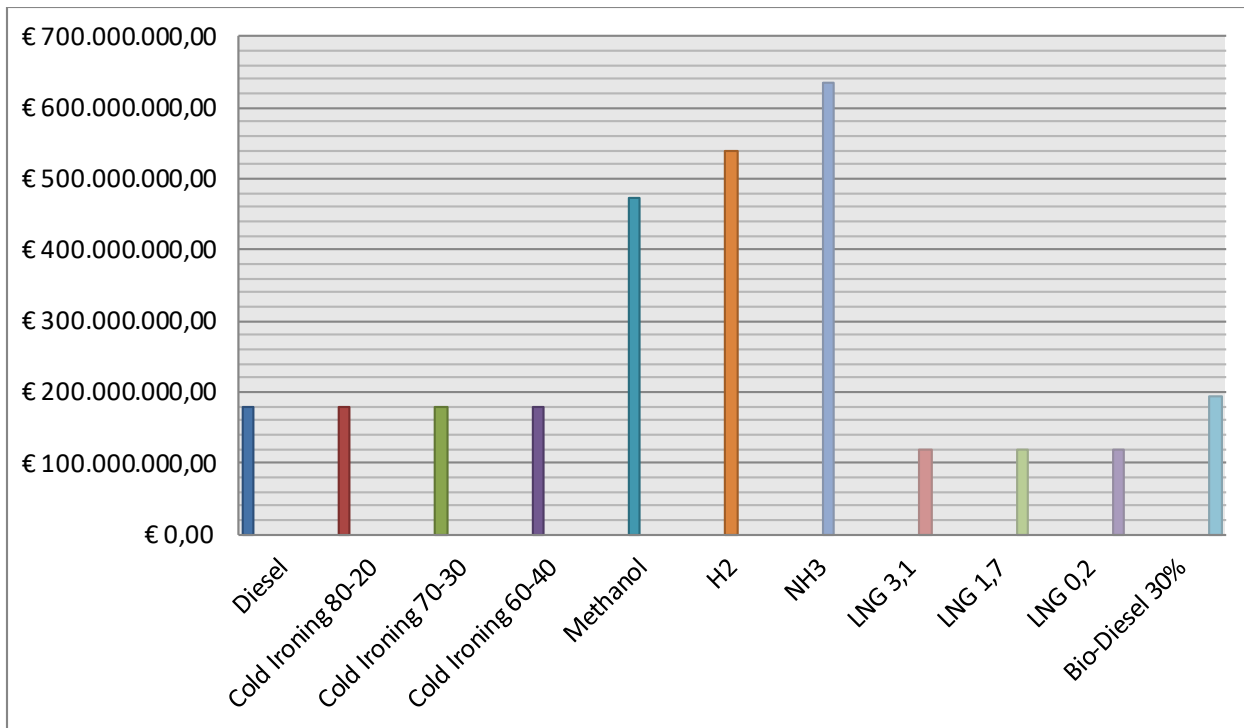
Διάγραμμα 23: Συνολικά ετήσια κόστη λειτουργίας ανά στόλο για τη χρονική περίοδο 2023 – 2024



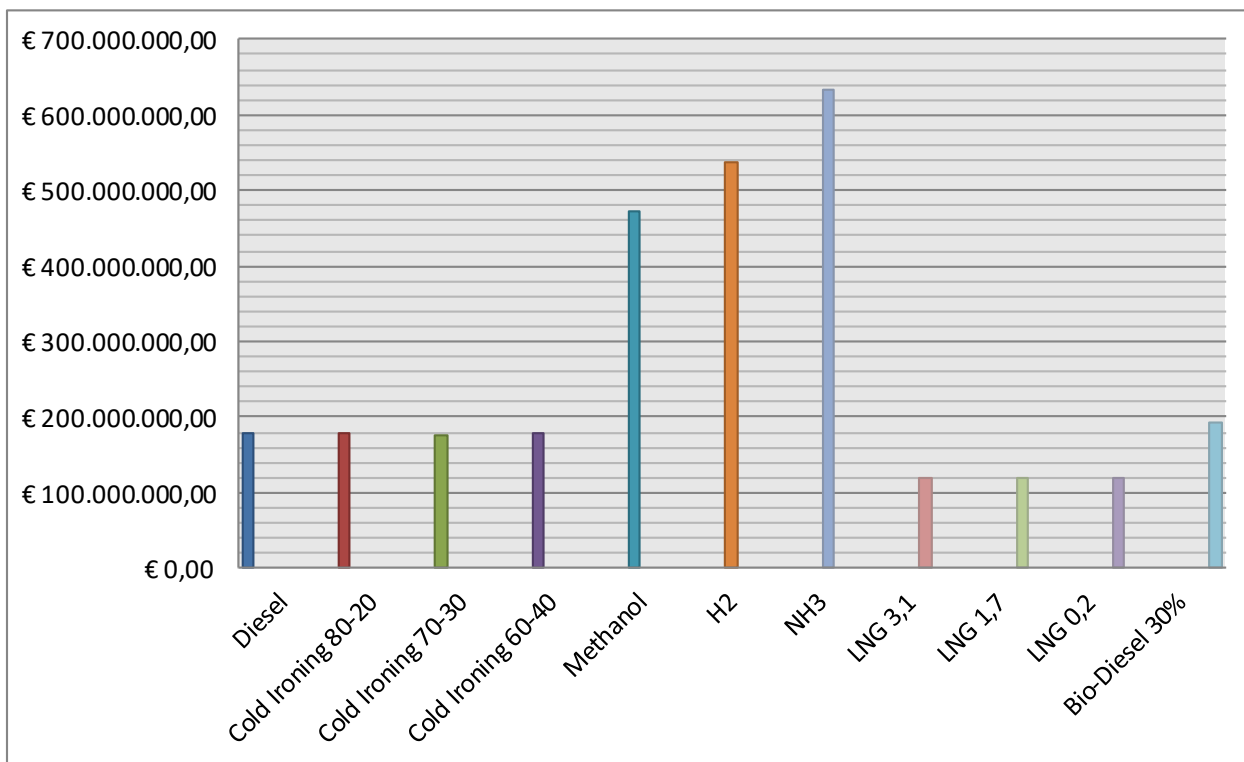
Διάγραμμα 24: Συνολικά ετήσια κόστη λειτουργίας ανά στόλο για τη χρονική περίοδο 2025 – 2029



Διάγραμμα 25: Συνολικά ετήσια κόστη λειτουργίας ανά στόλο για τη χρονική περίοδο 2030 – 2032



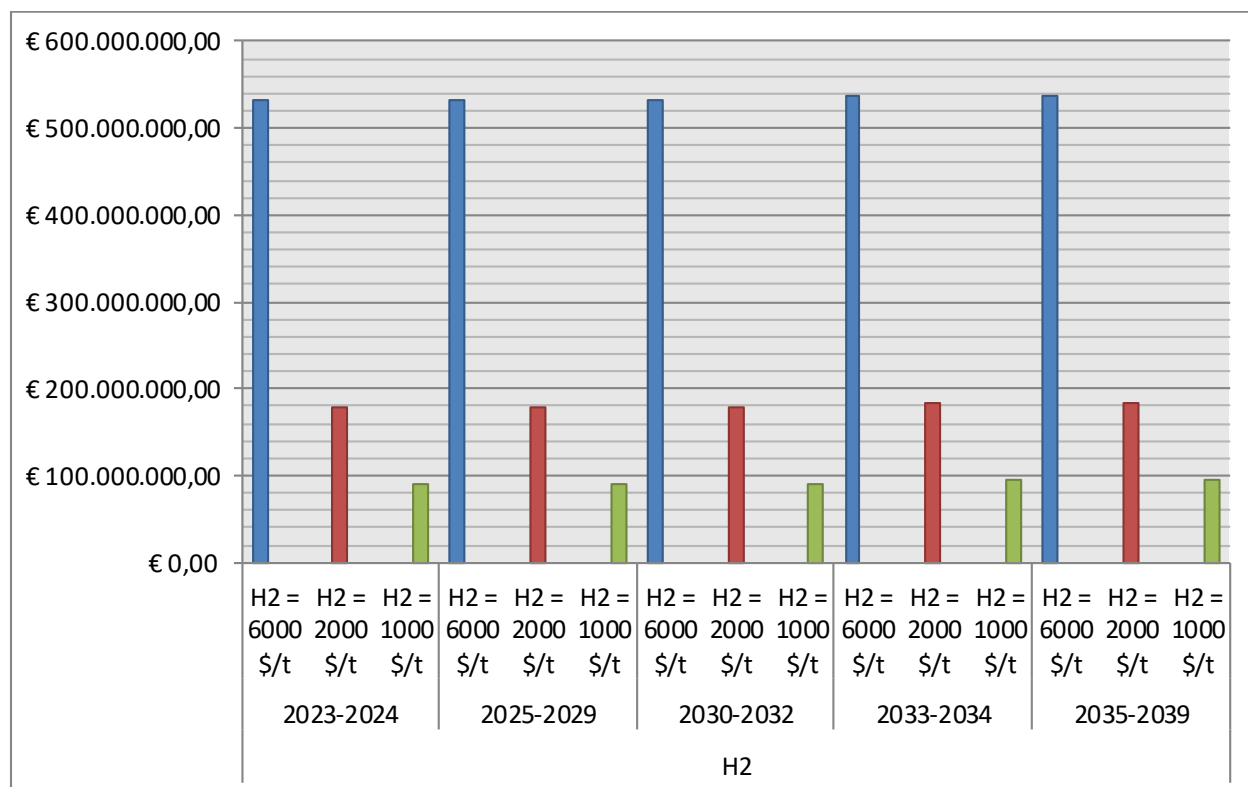
Διάγραμμα 26: Συνολικά ετήσια κόστη λειτουργίας ανά στόλο για τη χρονική περίοδο 2033 – 2034



Διάγραμμα 27: Συνολικά ετήσια κόστη λειτουργίας ανά στόλο για τη χρονική περίοδο 2035 – 2039

Σε όλες τις χρονικές περιόδους τα «ριζοσπαστικά» εναλλακτικά καύσιμα είναι τα πιο κοστοβόρα, λόγω του υψηλού κόστους απόκτησής τους. Πιο συγκεκριμένα, την πιο ακριβή λειτουργία έχει η αμμωνία, δεύτερο σε ακρίβεια ανέρχεται το υδρογόνο ενώ τρίτο σε αυτήν την κατάταξη φτάνει η μεθανόλη. Κατά μέσο όρο, η απόκλιση των κόστων των τριών παραπάνω καυσίμων από τα συμβατικά καύσιμα ναυτιλίας είναι 369,27%, 312,67% και 274,96% αντίστοιχα. Το βιοντίζελ ξεπερνάει για λίγο το λειτουργικό κόστος του ντίζελ, συγκεκριμένα για 15 με 20 εκατομμύρια ευρώ, ενώ το cold ironing φτάνει στα ίδια ύψη με τα κόστη του ντίζελ, έχοντας απόκλιση, θετική ή αρνητική, 1 – 2 % αναλόγως τη χρονική περίοδο και το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από τη στεριά. Τέλος, το LNG σε όλες τις χρονικές περιόδους αποδεικνύεται φθηνότερο από τα συμβατικά καύσιμα της ναυτιλίας κατά 55 με 60 εκατομμύρια ευρώ.

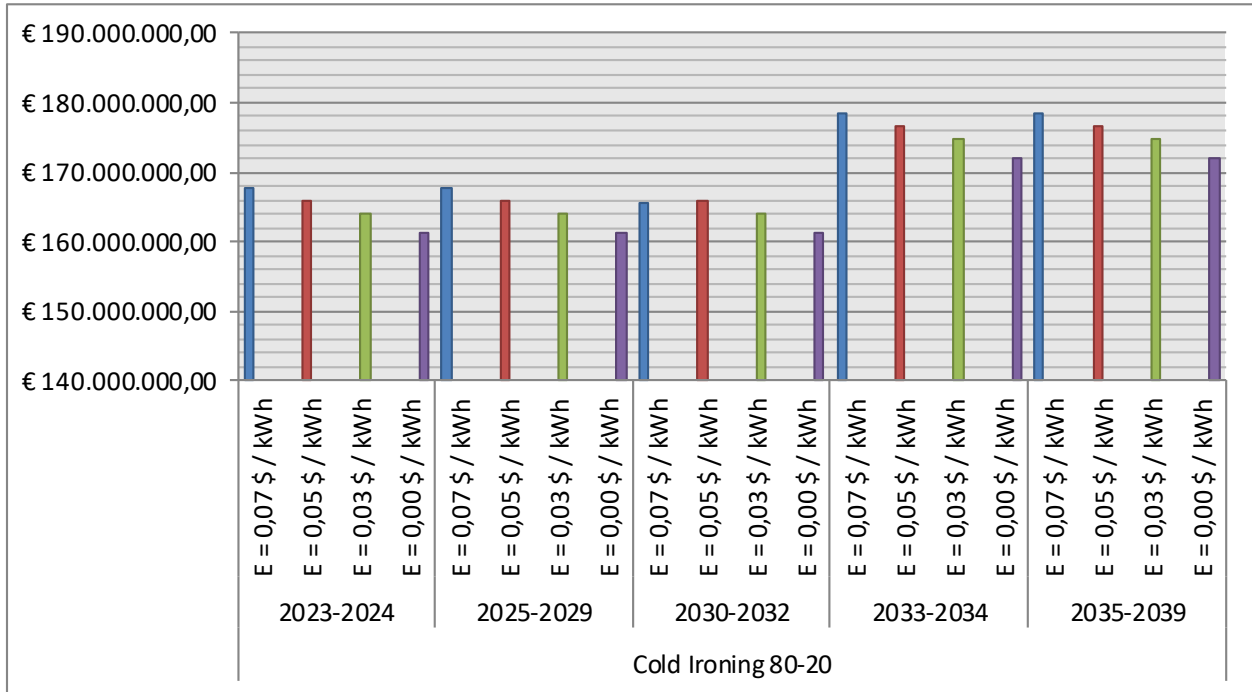
- Σύγκριση λειτουργικών κόστων για διάφορες τιμές απόκτησης υδρογόνου



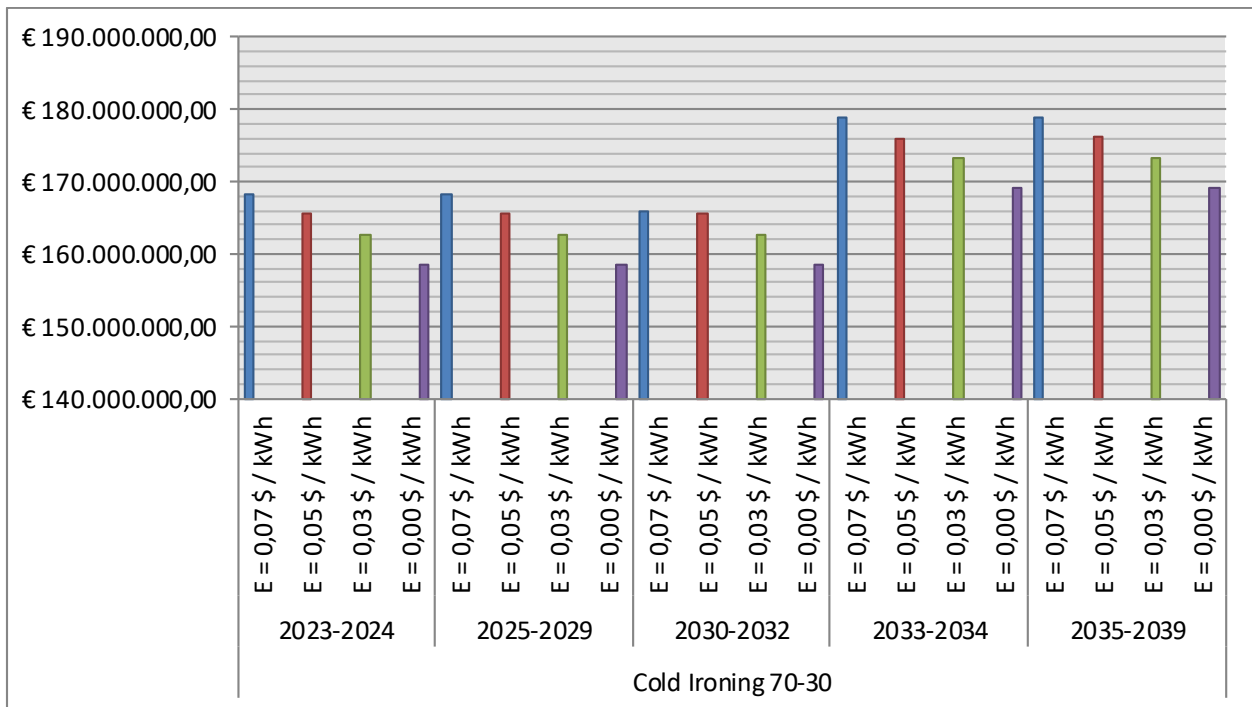
Διάγραμμα 28: Σύγκριση ετήσιων κόστων λειτουργίας ανά στόλο για διαφορετικές τιμές απόκτησης υδρογόνου

Αν η τιμή του πράσινου υδρογόνου φτάσει τα 2000 \$/t και 1000 \$/t έναντι των 6000 \$/t του σημερινού γκρι υδρογόνου, τότε τα συνολικά λειτουργικά κόστη σε όλες τις χρονικές περιόδους θα είναι ελαττωμένα κατά 353550737,82 € και 441938422,28 € αντίστοιχα.

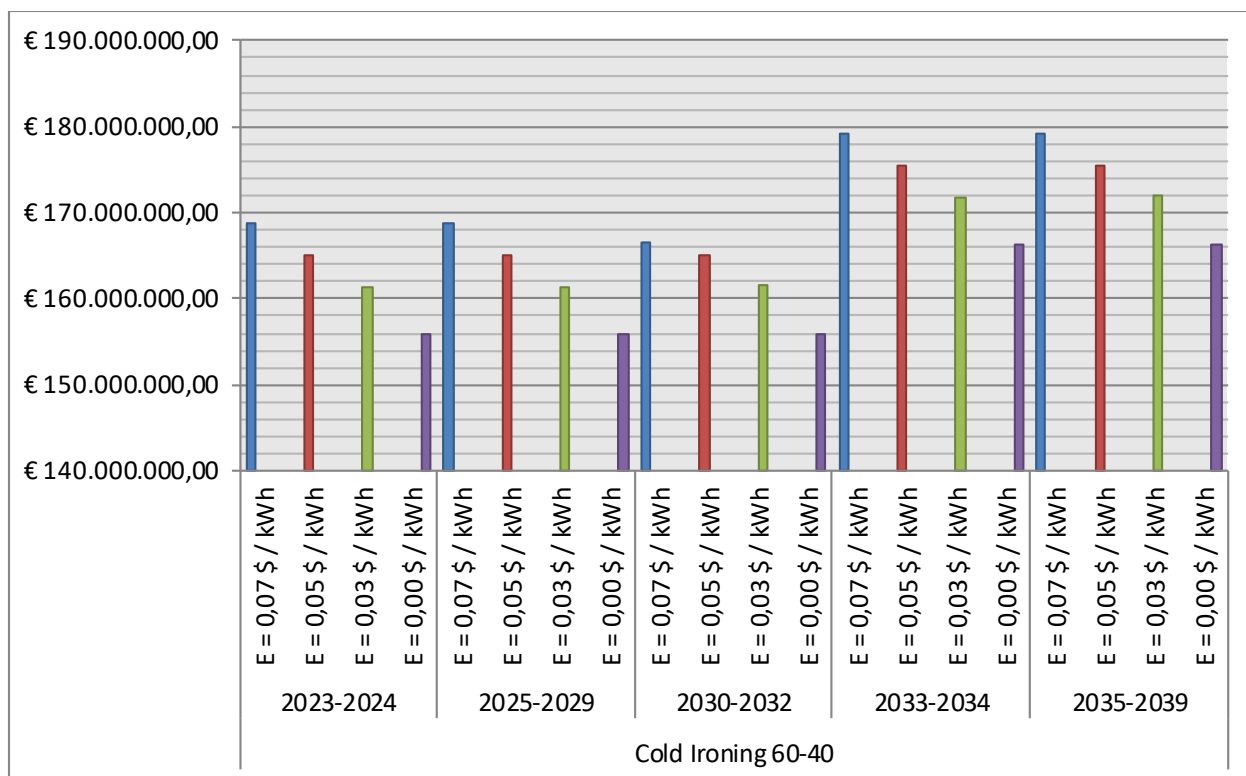
- Σύγκριση λειτουργικών κόστων cold ironing για διάφορες τιμές kWh



Διάγραμμα 29: Σύγκριση ετήσιων κόστων λειτουργίας της περίπτωσης cold ironing (ποσοστό παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας 20%) ανά στόλο για διαφορετικές τιμές απόκτησης της kWh



Διάγραμμα 30: Σύγκριση ετήσιων κόστων λειτουργίας της περίπτωσης cold ironing (ποσοστό παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας 30%) ανά στόλο για διαφορετικές τιμές απόκτησης της kWh



Διάγραμμα 31: Σύγκριση ετήσιων κόστων λειτουργίας της περίπτωσης cold ironing (ποσοστό παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας 40%) ανά στόλο για διαφορετικές τιμές απόκτησης της kWh

Παρατηρείται ότι, όταν η τιμή απόκτησης του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ίση με 0,07 \$/kWh (σημερινή τιμή της κιλοβατόρας), όσο αυξάνεται το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από την ξηρά τόσο αυξάνεται και το συνολικό κόστος. Για τις υπόλοιπες τιμές της kWh συμβαίνει το αντίστροφο φαινόμενο. Δηλαδή, για αύξηση του ποσοστού της παρεχόμενης από το λιμάνι ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται το συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας.

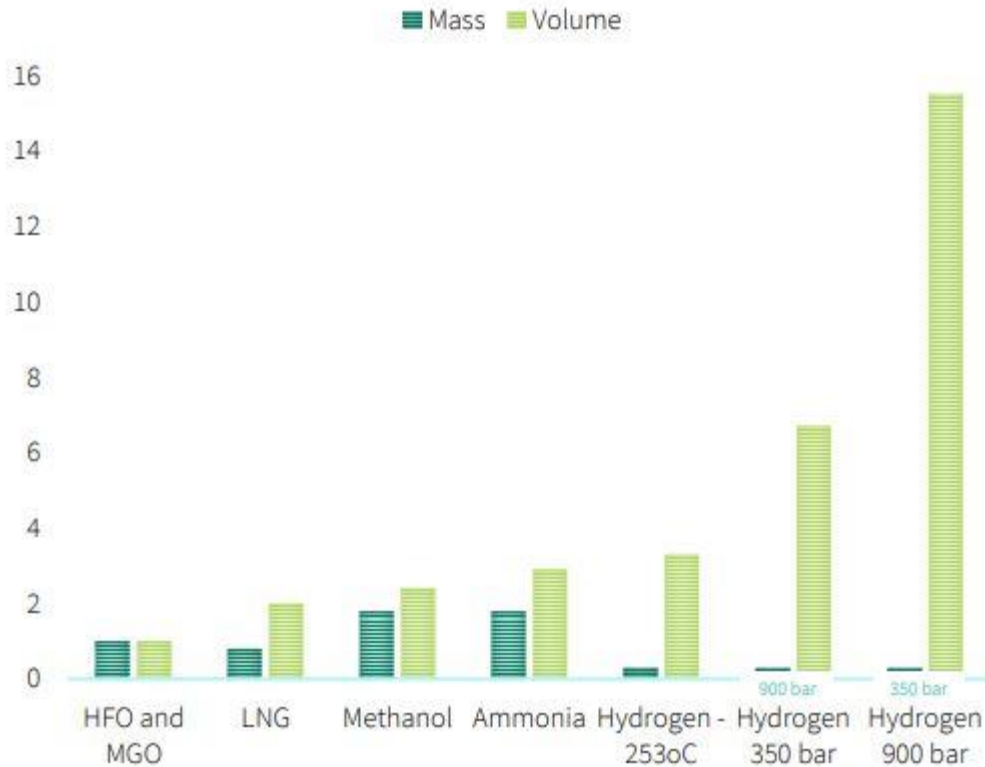
Κεφάλαιο 2: Συμπεράσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής αυτής εργασίας:

- 1) Το πιο φιλικό στο περιβάλλον καύσιμο φαίνεται να είναι η αμμωνία ενώ το πιο εχθρικό το υδρογόνο. Ταυτόχρονα, σημαντικό ρόλο μπορούν να παίξουν το βιοντίζελ και το LNG, εφόσον μειωθεί το methane slip.

Όταν τα εναλλακτικά καύσιμα παράγονται με πράσινο τρόπο αποτελούν την καλύτερη εναλλακτική λύση για την επίτευξη των στόχων και του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) και της Ευρωπαϊκής Ένωσης, λόγω της απουσίας ατόμου άνθρακα από τη χημική τους σύνθεση. Αντίστοιχα, είναι ξεκάθαρο πως, εάν η παραγωγή ενός καυσίμου δεν γίνεται με πράσινο τρόπο, όπως για παράδειγμα το γκρι υδρογόνο, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα μπορεί να είναι χειρότερο από αυτό των συμβατικών καυσίμων. Συνεπώς, για καύσιμα τα οποία δεν έχουν άτομο άνθρακα στη χημική τους σύνθεση, όπως η αμμωνία και το υδρογόνο, η βιωσιμότητά τους και ο ρόλος τους στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας εξαρτώνται άμεσα από τον τρόπο παραγωγής τους.

Επίσης, σε μεσοπρόθεσμο ή βραχυπρόθεσμο διάστημα, όπου δεν υπάρχει διαθεσιμότητα πράσινης αμμωνίας ή πράσινου υδρογόνου, η λύση του υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG ή η λύση των βιοκαυσίμων φαίνονται ικανοποιητικές σαν καύσιμα μετάβασης. Η μεθανόλη, λόγω του χαμηλού carbon factor που έχει, φαίνεται μία υποσχόμενη λύση τόσο ως καύσιμο μετάβασης αλλά και ως μακροπρόθεσμη λύση η οποία βέβαια θα εξαρτηθεί από τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ το οποίο παράγεται από παγίδευση άνθρακα – carbon capture). Με τη μεθανόλη και την αμμωνία παρατηρείται ότι ένα μεγάλο εμπόδιο, πέραν των ζητημάτων ασφάλειας, αποτελεί η ογκομετρική ενεργειακή τους πυκνότητα. Είναι χαρακτηριστικό ότι για παρόμοια ενέργεια, που απαιτείται για ορισμένο μεταφορικό έργο, χρειάζεται τρεις φορές περισσότερος όγκος αμμωνίας και 2,4 φορές περισσότερος όγκος μεθανόλης σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα VLSFO και HFO.



Διάγραμμα 33: Σύγκριση μάζας και όγκου που καταλαμβάνουν διάφορα καυσίμα (Κουρμπέλης Θ. 2022)

- 2) Καθοριστικό ρόλο έχει η θερμότητα ανά μονάδα καυσίμου. Αυτή αποτελεί τον παράγοντα που ορίζει την ποσότητα του κάθε καυσίμου που απαιτείται για να εξασφαλιστεί η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των πλοίων. Κατά συνέπεια, λοιπόν, έχει επίδραση και στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο αφού, όσο περισσότερη η ποσότητα του καυσίμου τόσο περισσότερες οι εκπομπές ρύπων και αντίστροφα.
- 3) Ο Carbon Intensity Indicator είναι σημαντικός αλλά μόνος του αποτελεί απλά ένα στατιστικό στοιχείο καθώς, επειδή δεν περιλαμβάνει τη φάση Well-to-Tank αλλά μόνο τη φάση Tank-to-Wake, δεν αντικατοπτρίζει πλήρως την πραγματικότητα. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα των αποτελεσμάτων, το υδρογόνο παρόλο που έχει πολύ χαμηλό δείκτη CII καταλήγει, λόγω των ρύπων που εκπέμπονται κατά την παραγωγή του, να είναι το πιο ρυπογόνο. Αντίστοιχα, στην περίπτωση του βιοντίζελ που παράγει λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από το ντίζελ, ο δείκτης CII του είναι λίγο πιο ψηλός από αυτόν του ντίζελ.
- 4) Από οικονομικής πλευράς, τα εναλλακτικά καύσιμα, με πρώτη την αμμωνία, είναι τα πιο κοστοβόρα, ενώ το LNG είναι πιο κερδοφόρο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Ακόμα, το cold ironing πρόκειται να έχει μικρότερα κόστη λειτουργίας μετά το 2030, όποτε και μειώνεται το electricity mix.

- 5) Συνολικά, τη δεδομένη χρονική στιγμή, το πιο συμφέρον καύσιμο αποδεικνύεται το υγροποιημένο φυσικό αέριο LNG, αφού εξασφαλίζει τα μικρότερα ετήσια κόστη και, ταυτόχρονα, έχει τη δυνατότητα να ανακουφίσει το περιβάλλον περισσότερο από τα συμβατικά καύσιμα της ναυτιλίας, με τη μείωση του methane slip.
- 6) Είναι πολύ σημαντικό να βρεθεί κάποιος τρόπος, είτε μέσα από την παραγωγή των εναλλακτικών πράσινων καυσίμων και του ηλεκτρισμού είτε μέσα από επιδοτήσεις από τις αρμόδιες αρχές, ώστε να μειωθούν τα κόστη απόκτησης αυτών. Όπως φάνηκε και στα αποτελέσματα, μείωση στις τιμές αυτές μπορεί να καταστήσει όχι μόνο πιο προσιτές αλλά και πιο δελεαστικές, αν συνυπολογιστούν οι χαμηλότερες φορολογίες και ποινές και τα υπόλοιπα ωφέλη τοΦυς. Με αυτόν τον τρόπο θα επιταχυνθεί, επίσης, και η επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) και από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ABS. 2021. Sustainability whitepaper: Hydrogen as marine fuel
2. ABS. 2021. Sustainability whitepaper: Methanol as marine fuel.
3. Air pollution & marine shipping. Ανακτήθηκε από <https://clearseas.org/en/air-pollution/>
4. Altieri, M., Bravo, E. Βιοκαύσιμα: Το τραγικό οικολογικό και κοινωνικό παράδειγμα της Αμερικής. Biotechwatch. Ανακτήθηκε από <http://www.biotechwatch.gr/usagofuelsparadigm>
5. Bell, B., Cacciottolo, M. 2017. Torrey Canyon oil spill: The day the sea turned black. BBC ανακτήθηκε από <https://www.bbc.com/news/uk-england-39223308>
6. BloombergNEF. 2021. Global LNG outlook 2021-25 overview. Ανακτήθηκε από <https://www.bloomberg.com/professional/blog/global-lng-outlook-2021-25-overview/>
7. C-Job. LH2 Europe & C-Job | Liquid hydrogen tanker. Ανακτήθηκε από <https://c-job.com/projects/liquid-hydrogen-tanker/>
8. DNV. 2022. Smells like sustainability: Harnessing ammonia as ship fuel. Ανακτήθηκε από https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Harnessing-ammonia-as-ship-fuel.html?utm_campaign=MA_22Q1_ART_Ind_351_Ammonia%20as%20ship%20fuel&utm_medium=email&utm_source=Eloqua
9. DNV. EEXI – Energy Efficiency Existing Ship Index. Ανακτήθηκε από <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/implementation.html>
10. Elengy. LNG: an energy of the future. Ανακτήθηκε από [https://www.elengy.com/en/lng/lng-an-energy-of-the-future.html#:~:text=Compared%20to%20traditional%20heavy%20fuel,SO2\)%20and%20fine%20particle%20emissions](https://www.elengy.com/en/lng/lng-an-energy-of-the-future.html#:~:text=Compared%20to%20traditional%20heavy%20fuel,SO2)%20and%20fine%20particle%20emissions)
11. Fluenta. 2022. LNG: what is boil-off gas and what does it do?. Ανακτήθηκε από <https://www.fluenta.com/lng-boil-off-gas/#:~:text=BOG%20generation%20is%20directly%20impacted,and%20affects%20the%20value%20chain>
12. Haskell, C. 2021. Decarbonising shipping – could ammonia be the fuel of the future?. Lloyd’s Register. Ανακτήθηκε από <https://www.lr.org/en/insights/articles/decarbonising-shipping-ammonia/>
13. Hayes, A. 2021. Liquefied Natural Gas (LNG). Ανακτήθηκε από <https://www.investopedia.com/terms/l/liquefied-natural-gas.asp>
14. HellenicShippingNews. 2021. Methanol – a bright future as a marine fuel. Ανακτήθηκε από <https://www.hellenicshippingnews.com/methanol-a-bright-future-as-a-marine-fuel/>
15. Hyseas3. Ανακτήθηκε από <https://www.hyseas3.eu/the-project/>

16. IMO. 2016. Air pollution and energy efficiency. Ανακτήθηκε από <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/Finland%20study%20on%20health%20benefits.pdf>
17. IMO. 2019. IMO 2020 – cleaner shipping for cleaner air. Ανακτήθηκε από <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>
18. IMO. 2020. Cutting sulphur oxide emissions. Ανακτήθηκε από <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
19. IMO. 2021. ISWG-GHG 9/WP.1/Rev.1: Draft lifecycle ghg and carbon intensity guidelines for maritime fuels (LCA guidelines), Annex 1
20. IMO. 2021. MEPC 76/7/30: reduction of ghg emissions from ships: proposal for a fleet-level monitoring option.
21. IMO. 2021. MEPC 76/INF.60: reduction of ghg emissions from ships: study on fleet-level compliance with CII regulation.
22. IMO. 2022. ISWG-GHG 11/2/3: Development of draft lifecycle ghg and carbon intensity guidelines for maritime fuels (draft LCA guidelines): Updated draft lifecycle ghg and carbon intensity guidelines for marine fuels
23. IMO. Emission Control Areas (ECAs) designated under MARPOL Annex VI. Ανακτήθηκε από [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx)
24. IMO. Fourth Greenhouse Gas Study 2020: Highlights. Ανακτήθηκε από <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
25. IMO. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Ανακτήθηκε από [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
26. IMO. Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. Ανακτήθηκε από [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
27. IMO. Special Areas under MARPOL. Ανακτήθηκε από <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-Marpol.aspx>
28. IMO. Third IMO GHG Study 2014. Ανακτήθηκε από <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Greenhouse-Gas-Studies-2014.aspx>
29. IMO. Third IMO Greenhouse Gas Study 2014. Ανακτήθηκε από <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/third-imo-ghg-study-2014-executive-summary-and-final-report.pdf>

30. ISO. 2012. ISO/IEC/IEEE 80005-1:2012: Utility connections in port – Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems – General requirements. Ανακτήθηκε από <https://www.iso.org/standard/53588.html>
31. Klein, T. 2020. Methanol: A Future-Proof Fuel: A Primer Prepared for the Methanol Institute. Future fuel strategies.
32. Kourmpelis, T. 2022. Regulatory update on LNG as Maritime Fuel. Lloyd’s Register
33. Le Fevre, C. 2018. A review of demand prospects for LNG as a marine transport fuel. The oxford institute for energy studies. Ανακτήθηκε από <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/07/A-review-of-demand-prospects-for-LNG-as-a-marine-fuel-NG-133.pdf>
34. Leprince-Ringuet, J. 2021. How To Advance Ammonia As A Marine Fuel: Charting A Path Towards Decarbonized Shipping. Total Energies. Ανακτήθηκε από <https://marinefuels.totalenergies.com/news/blog/how-to-advance-ammonia-as-a-marine-fuel-charting-a-path-towards-decarbonized-shipping>
35. Lloyd’s Register. 2015. LR to class the world’s first-ever methanol-powered sea vessel. Ανακτήθηκε από <https://www.lr.org/en/latest-news/lr-to-class-the-worlds-first-ever-methanol-powered-sea-vessel/>
36. Lloyd’s Register. Marine training: elearning course: EEXI and CII Regulation Awareness. Ανακτήθηκε από <https://www.lr.org/en/training/eexi-and-cii-regulation-awareness/>
37. Mambra, S. 2022. Top 10 Biggest LNG Ships of 2022. Marine Insight. Ανακτήθηκε από <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/biggest-lng-ships/>
38. Marine Insight. 2012. Methane Pioneer: The first LNG Ship in the World. Ανακτήθηκε από <https://www.marineinsight.com/types-of-ships/methane-pioneer-the-first-lng-ship-in-the-world/>
39. Maritime-executive. 2017. Hydrogen-Powered Ferry Christened. Ανακτήθηκε από <https://www.maritime-executive.com/article/hydrogen-powered-ferry-christened>
40. MEPC. 2011. Resolution MEPC.203(62): Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto, Annex 19. Ανακτήθηκε από [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Technical%20and%20Operational%20Measures/Resolution%20MEPC.203(62).pdf)
41. MEPC. 2021 Resolution MEPC.336(76): 2021 guidelines on operational carbon intensity indicators and the calculation methods (CII guidelines, G1), Annex 10
42. MEPC. 2021 Resolution MEPC.337(76): 2021 guidelines on operational carbon intensity indicators (CII guidelines, G2), Annex 11
43. MEPC. 2021 Resolution MEPC.338(76): 2021 guidelines on operational carbon intensity factors relative to reference lines (CII reduction factors guidelines, G3), Annex 12

44. MEPC. 2021 Resolution MEPC.339(76): 2021 guidelines on operational carbon intensity ratings of ship (CII rating guidelines, G4), Annex 13
45. Methanex. Methanol as Marine Fuel. Ανακτήθηκε από <https://www.methanex.com/news/waterfront-shipping-takes-leadership-role-demonstrating-simplicity-methanol-bunkering-marine#:~:text=Waterfront%20Shipping%20recently%20ordered%20an,%2C%20methanol%20dual%20fuel%20technology>
46. Methanex. Waterfront shipping takes leadership role in demonstrating simplicity of methanol bunkering to marine industry. Ανακτήθηκε από <https://www.methanex.com/news/waterfront-shipping-takes-leadership-role-demonstrating-simplicity-methanol-bunkering-marine#:~:text=Waterfront%20Shipping%20recently%20ordered%20an,%2C%20methanol%20dual%20fuel%20technology>
47. Naftemporiki. 2016. Το βιοντίζελ ίως είναι πιο επιβλαβές από τη βενζίνη για το περιβάλλον. Ανακτήθηκε από <https://m.naftemporiki.gr/story/1140816/to-biontizel-isos-einai-pio-epiblabes-apo-ti-benzini-gia-to-periballon>
48. Nakilat. Ανακτήθηκε από <https://www.nakilat.com/our-fleet/>
49. Official Journal of the European Union. 2006. On the promotion of shore-side electricity for use by ships at berth in Community ports. Ανακτήθηκε από <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:125:0038:0042:EN:PDF>
50. Prousalidis, J., Kourmpelis, T., Lyridis, D., Vergetis, E., Georgiou, V., Katsikas, P., et al. The ports as smart micro-grids: development perspectives
51. Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea (REMPEC). 2020. Med Sox ECA. Ανακτήθηκε από <https://www.rempec.org/en/our-work/pollution-prevention/hop-topics/med-eca/med-sox-eca-introduction>
52. Riviera. 2008. Mozah launches Q-max era 1. Ανακτήθηκε από <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/mozah-launches-q-max-era-1-53908>
53. Roberts. 2021. World merchant fleet and top 15 shipowning countries (2021*). Ανακτήθηκε από <http://infomaritime.eu/index.php/2021/08/22/top-15-shipowning-countries/>
54. Rofrigue, J.P., Notteboom, T. International Seaborne Trade and Exports of Goods, 1955-2020. Ανακτήθηκε από <https://transportgeography.org/contents/chapter5/maritime-transportation/international-seaborne-trade/>
55. Safety4sea. 2019. Cold Ironing: The role of ports in reducing shipping emissions. Ανακτήθηκε από <https://safety4sea.com/cm-cold-ironing-the-role-of-ports-in-reducing-shipping-emissions/>

56. Safety4sea. 2019. Talling Grupp conducts its first cold ironing at Stockholm port. Ανακτήθηκε από <https://safety4sea.com/tallink-grupp-conducts-its-first-cold-ironing-at-stockholm-port/>
57. Sembcomp Marine. 2021. World's First Liquid Hydrogen-powered Vessel Wins Ship of the Year Award. Ανακτήθηκε από <https://www.sembmarine.com/2021/09/30/worlds-first-liquid-hydrogen-powered-vessel-wins-ship-of-the-year-award>
58. Shell. Liquefied Natural Gas (LNG). Ανακτήθηκε από <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/liquefied-natural-gas-lng.html>
59. Ship-technology. 2014. Methane Princess LNG Carrier. Ανακτήθηκε από <https://www.ship-technology.com/projects/methane-princess-lng-carrier/>
60. Ship-technology. 2017. Hydroville Passenger Ferry. Ανακτήθηκε από <https://www.ship-technology.com/projects/hydroville-passenger-ferry/>
61. Stenaline. 2021. The world's first methanol ferry. Ανακτήθηκε από <https://www.stenaline.com/media/stories/the-worlds-first-methanol-ferry/>
62. Tenenbaum, D. 2008. Food vs. Fuel: Diversion of Crops Could Cause More Hunger. National Library of Medicine. Ανακτήθηκε από <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2430252/>
63. Tullo, A. 2021. Is ammonia the fuel of the future?. Chemical & engineering news. Ανακτήθηκε από <https://cen.acs.org/business/petrochemicals/ammonia-fuel-future/99/i8>
64. Wartsila. Ανακτήθηκε από <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/cold-ironing>
65. Wartsila. Ανακτήθηκε από <https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/ferry/stena-germanica>
66. Wiebe, D., Donev, J. 2021. Types of hydrogen fuel. Ανακτήθηκε από https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_hydrogen_fuel
67. Williams, M. Fit for 55 – Initial Summary. Lloyd's Register
68. Wodek, T. 2019. Analysis of boil-off rate problem in Liquefied Natural Gas (LNG) receiving terminals. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ανακτήθηκε από <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/214/1/012105/pdf>
69. WWF Ελλάς. Οικολογική επιθεώρηση. Ανακτήθηκε από https://www.oikologos.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=154:0636&catid=34:climate&Itemid=202
70. Αγγελίδης, Ευ. 2019. Μελέτη και διερεύνηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών συμβατικών πλοίων και η εφαρμογή τους στην πρόωση μέσω υβριδικών συστημάτων (Διπλωματική εργασία). ΕΜΠ. Αθήνα

71. Δανιήλ, Α. 2018. Διερεύνηση Μεθόδων Ενεργειακής Αναβάθμισης στο Λιμάνι της Πάτρας (Διπλωματική εργασία). ΕΜΠ. Αθήνα
72. Λόης, Ε., Ζαννίκος, Φ., Καρώνης, Δ. 2014. Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών. ΕΜΠ. Αθήνα
73. Οι περί προδιαγραφών πετρελαιοειδών και καυσίμων νόμοι του 2003 και 2007. 2007. Επίσημη εφημερίδα της Κυπριακής Δημοκρατίας, Παράρτημα τρίτο, μέρος Ι, Κανονιστικές Διοικητικές Πράξεις, Αριθμός 4194. Ανακτήθηκε από http://www.cylaw.org/KDP/data/2007_1_198.pdf
74. Πανταζόπουλος, Δ. 2017. Διερεύνηση της Ηλεκτρικής Διασύνδεσης Πλοίων στα Λιμάνια του Πειραιά και της Κυλλήνης (Διπλωματική εργασία). ΕΜΠ. Αθήνα
75. Παπαμιχαήλ, Γ. 2019. Παράκτια ηλεκτρική διασύνδεση πλοίων στους λιμένες της Ρόδου (Μεταπτυχιακή εργασία). ΕΜΠ. Αθήνα
76. Παπούτσογλου, Θ. 2012. A Cold Ironing Study on Modern Ports, Implentation and Benefits Thriving for Worldwide Ports (Διπλωματική εργασία). ΕΜΠ. Αθήνα
77. Προυσαλίδης, Ι. 2020. Ηλεκτρικές διασυνδέσεις πλοίων και λιμένων και προοπτικές ενεργειακής αναβάθμισης λιμένων. Ηλεκτρολόγος. Ανακτήθηκε από <https://www.electrologos.gr/wp-content/uploads/2021/03/%CE%A4%CE%95%CE%A7%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%9F-%CE%91%CE%A1%CE%98%CE%A1%CE%9F-%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%A5%CE%A3%CE%91%CE%9B%CE%99%CE%94%CE%97%CE%A3.pdf>
78. Προυσαλίδης, Ι. 2021. Η ηλεκτρική ενέργεια στη υπηρεσία της Ναυτιλίας. Ανακτήθηκε από <https://www.isalos.net/2021/05/i-ilektriki-energeia-stin-ypiresia-tis-naftilias/>
79. Προυσαλίδης, Ι. 2021. Οι λιμένες ως πράσινοι ενεργειακοί κόμβοι. Διεθνής Έκθεση Θεσσαλονίκης
80. Ραπτοτάσιος, Σ. 2018. Χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στη Ναυτιλία με Σκοπό τη Συμμόρφωση με τους Διεθνείς Κανονισμούς Ρύπων (Μεταπτυχιακή εργασία). ΕΜΠ. Αθήνα
81. Σουφλής, Α. 2021. Assessing the implementation of Shaft Generators (PTO) onboard LNG carriers (Διπλωματική εργασία). ΕΜΠ. Αθήνα
82. Σπύρου, Κωνσταντίνος. 2017. Μελέτη και εξοπλισμός πλοίου ΙΙ. ΕΜΠ
83. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Ανακτήθηκε από <https://www.meteo.gr/pdf/thermokipio.pdf>