



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ

Επιπτώσεις από την εφαρμογή των
κανονισμών IMO 2020 και εξελίξεις στην
αντιμετώπιση τους

Διπλωματική εργασία

Πασχαλίδης Βύρωνας

Επιβλέπων καθηγητής:

Φανούριος Ζαννίκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και αναλύονται οι επιπτώσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή του κανονισμού IMO 2020, οι επί του παρόντος πολιτικές συμμόρφωσης, καθώς και οι μελλοντικές επιλογές για την αντιμετώπισή τους. Καθώς η διεθνής ναυτιλία συνεχίζει να αναπτύσσεται, οι εκπομπές ρύπων, επίσης αυξάνονται, με τα οξείδια του θείου, SO_x, των οποίων οι συνέπειες στο περιβάλλον είναι σημαντικότερες, να παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο σε αυτές. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization, IMO) θεσπίζει κανονισμούς για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ναυτιλίας. Οι νέοι κανονισμοί IMO 2020 περιορίζουν την περιεκτικότητα σε θείο στα ναυτιλιακά καύσιμα στο 0,5% κατά βάρος γενικά και 0,1% κατά βάρος σε συγκεκριμένες περιοχές. Σύμφωνα με τον IMO η εφαρμογή του, θα οδηγήσει σε μείωση θανάτων και παθήσεων που σχετίζονται με τις εκπομπές ρύπων, ενώ γίνεται πρόβλεψη για σημαντική μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου από την παγκόσμια ναυτιλία. Τα αντανάκλαστα του ναυτιλιακού χώρου μέχρι στιγμής δείχνουν να ανταποκρίνονται σε βραχυπρόθεσμες λύσεις, όπως η χρήση μειγμάτων πετρελαίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers), ενώ ένα μικρό μερίδιο ανήκει στο Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Liquefied Natural Gas, LNG). Υπό το πρίσμα αυτό λοιπόν, βλέπουμε ότι οι ναυτιλιακές εταιρίες καλούνται να διαχειριστούν, με ποικίλους τρόπους, ένα επιπλέον κόστος που προκύπτει από τις απαιτούμενες αλλαγές, όπως βελτιστοποίηση στην κατασκευή και στον τρόπο λειτουργίας των πλοίων. Ταυτόχρονα τα διυλιστήρια καλούνται να αναπτύξουν καινοτόμους τρόπους παραγωγής νέων καυσίμων. Όσον αφορά τις εναλλακτικές πιθανές μελλοντικές επιλογές, διάφορες συμβατικές και μη συμβατικές μέθοδοι αποθείωσης συζητούνται για την επεξεργασία καυσίμων ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις που θέτει ο IMO 2020, αλλά και καύσιμα μη πετρελαϊκής προέλευσης, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική και ηλιακή), οι κυψέλες καυσίμων, αλλά και τα βιοκαύσιμα (βιοντίζελ, ανανεώσιμο ντίζελ). Σίγουρα πάντως η επιλογή του εκάστοτε αρμοδίου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του και το νέο κανονισμό IMO 2030, που θα αφορά μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Λέξεις κλειδιά: Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, MARPOL, ναυτιλία, επιπτώσεις, επιλογές συμμόρφωσης, ναυτιλιακά καύσιμα, μαζούτ, ναυτιλιακό ντίζελ, όριο θείου, φυσικό αέριο, πλυντρίδες, ΑΠΕ, βιοκαύσιμα, εναλλακτικά καύσιμα, αποθείωση, ECAs

Abstract

This thesis presents and analyzes the effects resulting from the implementation of the IMO 2020 regulation, the current compliance policies, as well as the future options for dealing with them. As international maritime continues to grow, emissions are also increasing, with sulfur oxides, SO_x, whose environmental consequences are significant, playing a leading role. The International Maritime Organization (IMO) establishes regulations to reduce the environmental impact of shipping. The new IMO 2020 regulations limit the sulfur content of marine fuels to 0.5% by weight in general and 0.1% by weight in certain areas. According to the IMO, this implementation will lead to a reduction in deaths and illnesses related to pollutant emissions, while provision are made for a significant reduction in sulfur oxide emissions from global shipping. Considering these, it becomes clear that shipping companies are required to manage, in a variety of ways, an additional cost resulting from the required changes, such as optimization in the construction and operation of the ships. At the same time, refineries are called upon to develop innovative ways of producing new fuels. The shipping industry so far seem to respond with short-term solutions, such as the use of oil mixtures with a low sulfur content, exhaust gas cleaning systems (scrubbers), while a small share with Liquefied Natural Gas (LNG). Considering all that, the effects of IMO 2020, both economic and environmental, are examined. Regarding the alternative possible future options, various conventional and non-conventional desulfurization methods are discussed for fuel treatment to meet the requirements set by IMO 2020, as well as non-petroleum originated fuels such as renewable energy sources (wind and solar), fuel cells and biofuels (biodiesel, renewable diesel). Certainly, however, the choice of each competent authority should also consider the new IMO 2030 regulation, which will concern the reduction in greenhouse gas emissions.

Keywords: International Maritime Organization, MARPOL, shipping, impacts, compliance options, marine fuel, fuel oil, marine diesel, sulfur limit, natural gas, scrubbers, RES, biofuels, alternative fuels, desulphurization, ECAs

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Περίληψη..... | 2 |
| Abstract..... | 3 |
| 1. Εισαγωγή..... | 6 |
| 2. Ναυτιλιακά Καύσιμα..... | 7 |
| 2.1 Ιδιότητες Ναυτιλιακών Καυσίμων | 8 |
| 2.2.1 Απαιτήσεις Ισχύος..... | 8 |
| 2.2.2 Φυσικοχημικές απαιτήσεις..... | 8 |
| 2.3 Επιπτώσεις στο περιβάλλον | 14 |
| 2.3.1 Οξείδια του Θείου (SOx) | 14 |
| 2.3.2 Οξείδια του Αζώτου (NOx)..... | 15 |
| 2.3.3 Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου | 16 |
| 2.3.4 Αιωρούμενα μικροσωματίδια | 17 |
| 3. Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) | 18 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 18 |
| 3.2 Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)..... | 18 |
| 3.3 Περιβαλλοντικοί κανονισμοί | 20 |
| 3.4 Ο Κανονισμός IMO 2020..... | 21 |
| 4. Επιπτώσεις του κανονισμού IMO 2020 | 25 |
| 4.1 Επιπτώσεις του IMO 2020 στη ναυτιλία..... | 26 |
| 4.1.1 Οι τρεις Πολιτικές Συμμόρφωσης..... | 26 |
| 4.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών επιλογών..... | 28 |
| 4.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή..... | 31 |
| 4.1.4 Επακόλουθα αποτελέσματα..... | 32 |
| 4.2 Επιπτώσεις του IMO 2020 στην οικονομία | 37 |
| 4.2.1 Σύγκριση πολιτικών συμμόρφωσης | 37 |
| 4.2.2 Επιπτώσεις από την εγκατάσταση πλυντρίδων | 37 |
| 4.2.3 Επιπτώσεις από τις τιμές καυσίμων | 38 |
| 4.2.4 Επιπτώσεις στις οικονομικές αποδόσεις..... | 40 |
| 4.2.5 Προβλέψεις για το μέλλον..... | 41 |
| 4.3 Επιπτώσεις του IMO 2020 στο περιβάλλον και τον άνθρωπο | 42 |
| 4.4 Επιπτώσεις του IMO 2020 στη βιομηχανία κατασκευής πλοίων..... | 45 |
| 4.5 Επιπτώσεις του IMO 2020 στη βιομηχανία πετρελαίου | 46 |

| | |
|--|----|
| 5. Εξελίξεις στην αντιμετώπισή τους..... | 47 |
| 5.1 Ναυτιλιακά Καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο | 47 |
| 5.1.1 Υδρογοναποθείωση | 47 |
| 5.1.2 Αποθείωση με Εκχύλιση | 50 |
| 5.1.3 Οξειδωτική αποθείωση | 52 |
| 5.1.4 Αποθείωση με προσρόφηση | 52 |
| 5.1.5 Βιολογική αποθείωση..... | 53 |
| 5.2 Εναλλακτικές επιλογές..... | 55 |
| 5.2.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)..... | 55 |
| 5.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) | 57 |
| 5.2.4 Κυψέλες καυσίμου (<i>Fuel cells</i>)..... | 60 |
| 5.2.5 Βιοκαύσιμα | 62 |
| 6. Συμπεράσματα..... | 65 |
| 7. Μελλοντικοί Κανονισμοί..... | 67 |
| 8. Βιβλιογραφία | 68 |

1. Εισαγωγή

Οι θαλάσσιες εμπορικές μεταφορές αποτελούν ζωτικής σημασίας κομμάτι για την παγκόσμια οικονομία. Τα θαλάσσια μέσα μεταφοράς παρέχουν υπηρεσίες στις διεθνείς και εγχώριες μεταφορές εμπορευμάτων και επιβατών. Για την εκπλήρωση των λειτουργιών τους, όλα τα πλοία, απαιτούν διαφορετικούς τύπους ενέργειας, αλλά η κύρια πηγή ενέργειας προέρχεται πάντα από τα ορυκτά καύσιμα. Η εποχή του άνθρακα ως καυσίμου ναυτιλίας έχει φτάσει στο τέλος της εδώ και εξήντα χρόνια και δε φαίνονται σημάδια ότι θα επιστρέψει. Οι διεργασίες διύλισης του αργού πετρελαίου παράγουν διάφορους τύπους ναυτιλιακών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης πλοίων (Marine Gas Oil, MGO), πετρέλαιο ντίζελ πλοίων (Marine Diesel Oil, MDO) και βαρέα μαζούτ (Heavy Fuel Oils, HFO) (ISO 8217) [1]. Υπάρχουν πάνω από 50.000 εν ενεργεία πλοία διεθνώς [2]. Περισσότερο από το 80% του παγκόσμιου εμπορίου μεταφέρεται μέσω της διεθνούς ναυτιλίας. [1]

Τα φορτηγά πλοία έχουν ισχυρούς κινητήρες που μπορούν να λειτουργούν σε ισχύ πάνω από 75 MW. Αυτό απαιτεί μεγάλη ζήτηση καυσίμων, περί τους 640.000 τόνους ημερησίως. Λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που χρησιμοποιείται ανά τόνο φορτίου ανά χιλιόμετρο, η ναυτιλία αποτελεί τον πιο ενεργειακά αποδοτικό τρόπο μεταφοράς. Ωστόσο, καθώς η ναυτιλιακή βιομηχανία αναπτύσσεται, οι εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα αυξάνονται. Όταν τα καύσιμα πετρελαίου καίγονται στις μηχανές του πλοίου, εκπέμπουν ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως οξείδια του θείου, του αζώτου και του άνθρακα [3].

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO), ο οποίος αποτελεί μια εξειδικευμένη υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών, ρυθμίζει τη ρύπανση από τα πλοία μέσω της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL). Ο νέος κανονισμός του IMO που τέθηκε σε ισχύ το 2020 περιορίζει την περιεκτικότητα σε θείο καύσιμα πλοίων σε 0,50 % ή 5000 ppm. [2]

Καθώς οι κανονισμοί γίνονται αυστηρότεροι, οι απαιτήσεις για καύσιμα πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο καθώς και για εναλλακτικούς τύπους καυσίμων αυξάνονται. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει τις απαιτήσεις των ναυτιλιακών καυσίμων, τους κανονισμούς IMO 2020 και τις επιδράσεις που έχουν στην οικονομία και τις εναλλακτικές λύσεις.

2. Ναυτιλιακά Καύσιμα

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά στη ναυσιπλοΐα είναι ένα σύνθετο μείγμα βαρέων υδρογονανθράκων που προέρχονται από το πετρέλαιο και ποικίλουν ανάλογα με την προέλευσή τους και το επίπεδο επεξεργασίας που λαμβάνουν. Τα υγρά ναυτιλιακά καύσιμα μπορούν γενικά να χωριστούν σε δύο κύριους τύπους: τα υπολειμματικά καύσιμα και τα καύσιμα απόσταξης. Τα υπολειμματικά ναυτιλιακά καύσιμα (Residual Marine Fuels, RMF) είναι φτιαγμένα από τα βαρέα υπολείμματα που αφήνει ως προϊόντα το διυλισμένο αργό πετρέλαιο. Τα ναυτιλιακά καύσιμα απόσταξης (Distilled Marine Fuels, DMF) θεωρούνται καθαρότερα και ελαφρύτερα από τα υπολειμματικά καύσιμα πλοίων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα καύσιμα RMF είναι πολύ παχύρρευστα και υψηλή περιεκτικότητα σε αρωματικές ενώσεις, ενώ τα καύσιμα DMF είναι παραφινικά και έχουν χαμηλότερη πυκνότητα [4]. Τα περισσότερα καύσιμα RMF πρέπει να αναμειχθούν με DMF για να μειωθεί το ιξώδες τους. Προς την ταξινόμηση των ναυτιλιακών καυσίμων, ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) έχει ορίσει κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου και το ιξώδες στο 50 °C (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Ιξώδες και περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων. [4]

| Τύπος Καυσίμου | Κατηγορία ISO | Ιξώδες (cSt) στους 50 °C και 40 °C, για | | Περιεκτικότητα σε θείο (%) |
|---|------------------------------|---|--------------|----------------------------|
| | | RMF και DMF, αντίστοιχα | | |
| | | Ελάχιστη τιμή | Μέγιστη τιμή | |
| Ναυτιλιακά Καύσιμα Απόσταξης (DMF) | DMA, DMB, DMX, DMZ | 1.4 | 6 | 0.10 - ≤0.5 |
| Υπολειμματικά Ναυτιλιακά Καύσιμα (RMF) | RMA, RMB, RMD, RME, RMG, RMX | 10 | 700 | 1.0 - 3.5 |
| Καύσιμα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα θείου (ULSFO-DM) | DMA, DMX | 1.4 | 6 | ≤0.10 |
| Καύσιμα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα θείου (ULSFO-RM) | Μικτά καύσιμα Κατηγορίας RM | 10 | 6 | ≤0.10 |
| Καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα θείου (VLSFO-DM) | DMA, DMX | 1.4 | 6 | ≤0.50 |
| Καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα θείου (VLSFO-RM) | Μικτά καύσιμα Κατηγορίας RM | 8 | 60 | ≤0.50 |
| Καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα θείου (HSHFO) | RMA, RMB, RMD, RME, RMG, RMX | 10 | 700 | >0.5 |

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι τα βαρέα μαζούτ (Heavy Fuel Oil, HFO) που είναι καύσιμο τύπου RMF με υψηλό ιξώδες, το ναυτιλιακό κλάσμα Gas Oil (Marine Gas Oil, MGO), που αποτελεί ένα καύσιμο τύπου DMF με χαμηλό ιξώδες και το ναυτιλιακό πετρέλαιο ντίζελ (Marine Diesel Oil, MDO),

ένα μείγμα αποσταγμάτων με μικρή ανάμιξη HFO. Για την επίτευξη διαφόρων προδιαγραφών και επιπέδων ποιότητας, τα υπολειμματικά καύσιμα αναμειγνύονται με ελαφρύτερα καύσιμα όπως το MGO ή το MDO. Τα προκύπτοντα μείγματα αναφέρονται επίσης ως ενδιάμεσα πετρέλαια μαζούτ (Intermediate Fuel Oil, IFO). Ταξινομούνται και ονομάζονται ανάλογα με το ιξώδες τους. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι είναι οι IFO 180 και IFO 380, με ιξώδη 180 mm²/s και 380 mm²/s, αντίστοιχα, σε θερμοκρασία 50°C .[2]

2.1 Ιδιότητες Ναυτιλιακών Καυσίμων

2.2.1 Απαιτήσεις Ισχύος

Κάθε πλοίο έχει διαφορετικές απαιτήσεις σε καύσιμα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κινητήρα του, την χωρητικότητα αποθηκευτικών χώρων και τις απαιτήσεις ισχύος. Υπάρχουν δύο κύριες απαιτήσεις ισχύος που πρέπει να καλύπτει το καύσιμο:

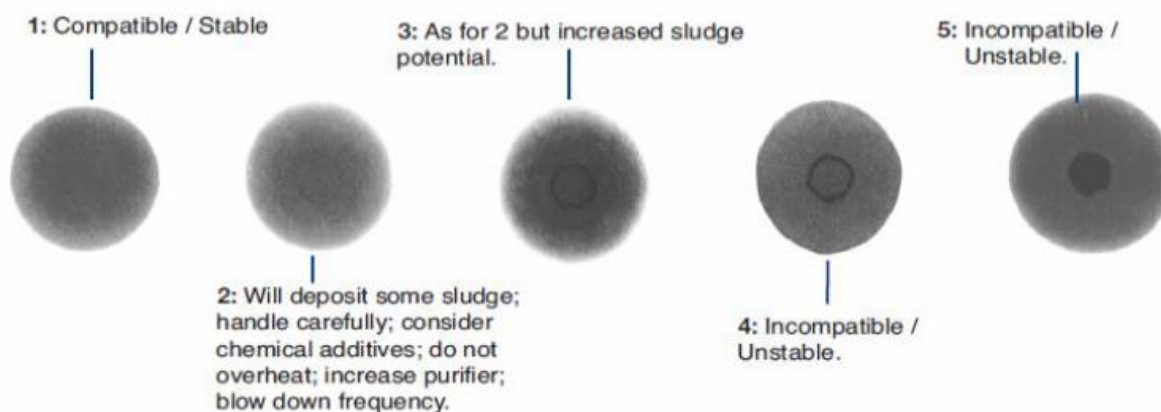
Ισχύς για πρόωση: Εξαρτάται από το πλοίο και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συνδυαστεί την καύση με ηλεκτρική ενέργεια. Το εύρος της απαιτούμενης ισχύος ποικίλλει σημαντικά από περίπου 0,15–100 MW. Το μεγάλο εύρος διαφορών οφείλεται στα διάφορα μεγέθη πλοίων και στις διαφορετικές χρήσεις τους. Για παράδειγμα, τα επιβατηγά, τα πλοία μεταφοράς κιβωτίων εμπορευμάτων, τα δεξαμενόπλοια και κρουαζιερόπλοια έχουν διαφορετικές ανάγκες ενέργειας. [2]

Βοηθητική ισχύς: Αυτό περιλαμβάνει την ισχύ που χρησιμοποιείται στα πλοία και δεν χρησιμοποιείται για πρόωση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα ηλεκτρονικά όργανα του πλοίου, τη θέρμανση, τον κλιματισμό και τα συστήματα έκτακτης ανάγκης. Στη ναυτιλιακή βιομηχανία, υπάρχουν δύο κύριοι τύποι κινητήρων που χρησιμοποιούνται. Ο τετράχρονος κινητήρας, που ονομάζεται επίσης κινητήρας εμβόλου κορμού. Ο δεύτερος τύπος κινητήρα είναι ο δίχρονος, που ονομάζεται επίσης κινητήρας crosshead. Και οι δύο κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με υπολειμματικά ή καύσιμα απόσταξης. [2]

2.2.2 Φυσικοχημικές απαιτήσεις

Συμβατότητα: Τα ναυτιλιακά καύσιμα αποτελούν ως επί το πλείστον προϊόντα ανάμιξης. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα συστατικά του μικτού καυσίμου είναι συμβατά μεταξύ τους. Επιπλέον, μπορεί να προκύψουν προβλήματα όταν συμβαίνουν συνεχείς αλλαγές στο καύσιμο. Αυτό συμβαίνει, όταν είναι επιθυμητός ο έλεγχος ορισμένων εκπομπών από τα πλοία σύμφωνα με τους κανονισμούς που έχουν τεθεί. Ωστόσο, η ασυμβατότητα μπορεί να προκαλέσει ζημιά στους κινητήρες και ο καθαρισμός τους είναι δύσκολος .[2]

Εικόνα 1: Ενδείξεις συμβατότητας και σταθερότητας καυσίμων.



Σταθερότητα: Εάν αποθηκευτούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, τα αδρανή ασφαλτένια στα καύσιμα ενδέχεται να διασπαστούν, με αποτέλεσμα να κατακρημνιστούν. Αυτό κάνει το καύσιμο ασταθές και είναι μια διαδικασία, η οποία δεν μπορεί να αντιστραφεί. Ανάλογα με τη σύνθεση του καυσίμου μπορεί να παρουσιαστούν διαφορετικές συμπεριφορές. Εάν το καύσιμο είναι πολύ αρωματικό, η άσφαλτος μπορεί να παραμείνει αιωρούμενη αλλά, αν είναι πολύ παραφινικό, μπορεί να σχηματιστεί ίζημα που θα μπορούσε να μπλοκάρει σωλήνες και φίλτρα. [2]

Αιωρούμενα Σωματίδια: Τα αιωρούμενα λεπτόκοκκα σωματίδια, υπολείμματα από καταλυτική επεξεργασία, γνωστά ως “cat fines”, εμφανίζονται στα βαρέα μαζούτ (HFO) στα διυλιστήρια πετρελαίου και είναι σε θέση να προκαλέσουν ταχεία φθορά στις επενδύσεις κυλίνδρων μεγάλων δίχρονων κινητήρων, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της καύσης. Το πρόβλημα επιδεινώθηκε πρόσφατα, ακούσια, από κανονισμούς που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου (SOx) στα καυσαέρια των κινητήρων. Αυτοί οδήγησαν στη χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, τα οποία είναι επιρρεπή σε υψηλότερες περιεκτικότητες λεπτόκοκκων σωματιδίων καταλυτών, λόγω πρόσθετης επεξεργασίας. [5]

Ποιότητα ανάφλεξης: Ο αριθμός κετανίου (Cetane Number, CN), μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες ενός καυσίμου ντίζελ, χρησιμοποιείται για να δείξει τη συμπεριφορά του αμέσως μετά τον ψεκασμό μέσα στον κύλινδρο ενός κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση, επομένως και την ποιότητα ανάφλεξης του. Συνήθως υπολογίζεται από τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της έναρξης της έγχυσης και της έναρξης της καύσης, που γενικά αναφέρεται ως καθυστέρηση ανάφλεξης (Ignition Delay, ID). Η

καθυστέρηση ανάφλεξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με τον ίδιο τον κινητήρα, όπως η αναλογία συμπίεσης, η πίεση ψεκασμού, το ακροφύσιο ψεκασμού, η γεωμετρία του κυλίνδρου και του εμβόλου, αλλά και το καύσιμο. Για να είναι σε θέση να παρέχει υψηλή ποιότητα ανάφλεξης, ένα καύσιμο ντίζελ συνήθως πρέπει να παρουσιάζει σύντομη καθυστέρηση ανάφλεξης. Όσο πιο σύντομη είναι η καθυστέρηση ανάφλεξης, τόσο λιγότερο μείγμα καυσίμου και αέρα συσσωρεύονται στο εσωτερικό του κυλίνδρου πριν καύση. Έτσι, όταν τελικά λαμβάνει χώρα η καύση, ο ρυθμός της καύσης παραμένει εντός λογικών ορίων, αποφεύγοντας πολύ υψηλούς ρυθμούς αύξησης της πίεσης που αυξάνουν τον θόρυβο, μειώνουν την απόδοση και μπορούν να βλάψουν τον κινητήρα. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι ένας υψηλός αριθμός κετανίου υποδηλώνει σύντομη καθυστέρηση ανάφλεξης, για ένα δεδομένο καύσιμο. Επιπλέον, τα καύσιμα με χαρακτηριστικά χαμηλής ποιότητας ανάφλεξης παρουσιάζουν κακή απόδοση εκπομπών καυσαερίων. Για τη μέτρηση της ποιότητας ανάφλεξης ενός δεδομένου καυσίμου χρησιμοποιείται συνήθως μία πρότυπη μηχανή εσωτερικής καύσης (Cooperative Fuel Research Engine, CFR Engine), όπως ορίζεται από τη μέθοδο ASTM D613. Ωστόσο, αυτή η διαδικασία είναι χρονοβόρα, απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό και μεγάλες ποσότητες ακριβών χημικών ως πρότυπα, καθώς και καύσιμα αναφοράς και δειγματοληψίας, πόσο μάλλον το υψηλό κόστος απόκτησης και συντήρησης ενός πρότυπου κινητήρα CFR. [6]

Σημείο ανάφλεξης (Flash point): Ως σημείο ανάφλεξης ενός υγρού ορίζεται η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία μια ουσία παράγει επαρκή ποσότητα ατμού για να σχηματίσει ένα μίγμα (ατμού/αέρα) που μπορεί να αναφλεγεί (πιλοτική ανάφλεξη). Το ελάχιστο σημείο ανάφλεξης όλων των καυσίμων που βρίσκονται σε οποιοδήποτε σκάφος, με περιορισμένες εξαιρέσεις, είναι 60°C. Το όριο τέθηκε από τη Διεθνή Σύμβαση για την ασφάλεια της ζωής στη θάλασσα (International Convention of the Safety of Life at Sea, SOLAS) και το πρότυπο ISO 8217 για τη διασφάλιση της ασφάλειας κατά των πυρκαγιών. [2]

Σημείο ροής (Pour point): Η παρουσία παραφινών στο αργό πετρέλαιο αντιπροσωπεύει σοβαρά προβλήματα στην παραγωγή, τη μεταφορά και τη διύλιση. Σε χαμηλή θερμοκρασία, οι κηρώδεις παραφίνες ανακρυσταλλώνονται, διαχωρίζονται από το αργό πετρέλαιο και εναποτίθενται στο τοίχωμα των αγωγών, γεγονός που μπορεί να φράξει τους αγωγούς και να μειώσει τη ρευστότητα του αργού πετρελαίου. Σημείο ροής είναι η θερμοκρασία στην οποία το αργό πετρέλαιο μπορεί απλώς να ρέει και κάτω από την οποία υπάρχει πλήρης απουσία ροής σε αυτό. Η διασφάλιση της ροής έχει γίνει μείζον τεχνικό και οικονομικό ζήτημα. [7]

Πυκνότητα (Density): Η πυκνότητα του καυσίμου πλοίων βοηθά στην πρόσβαση στην ποιότητα και τον τύπο του. Η υψηλότερη τιμή πυκνότητας αντιπροσωπεύει ότι το καύσιμο είναι βαρύτερο και έχει περισσότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα. Τα καύσιμα RM τείνουν να έχουν υψηλή πυκνότητα και υψηλή περιεκτικότητα σε αρωματικά, ενώ τα καύσιμα DM είναι λιγότερο πυκνά. [2]

Ιξώδες (Kinematic viscosity): Το ιξώδες παρουσιάζει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Το ιξώδες στα ναυτιλιακά καύσιμα πρέπει να διατηρείται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, ανάλογα με τον κινητήρα, ώστε να υπάρχει αποτελεσματική καύση. [2].

Το πρότυπο ISO 8217:2017 καθορίζει τις απαιτήσεις για καύσιμα για χρήση σε κινητήρες και λέβητες ντίζελ πλοίων, πριν από την συμβατική επεξεργασία επί του σκάφους (καθίζηση, φυγοκέντρηση, διήθηση). Οι προδιαγραφές για τα καύσιμα μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε σταθερούς κινητήρες ντίζελ του ίδιου ή παρόμοιου τύπου με αυτούς που χρησιμοποιούνται για θαλάσσιους σκοπούς.

Οι κατηγορίες ISO για υπολειμματικά καύσιμα ξεκινούν με τα γράμματα ISO-F-RM για να υποδεικνύουν μια κατηγορία καυσίμου που ορίζεται από το ISO (ISO-F), με τα γράμματα R και M να υποδηλώνουν ένα υπολειμματικό καύσιμο για χρήση ως ναυτιλιακό καύσιμο. Το τελευταίο γράμμα (A, B, D, E, G ή K) υποδηλώνει μια συγκεκριμένη κατηγορία. Το τελευταίο γράμμα ακολουθείται από έναν αριθμό (π.χ. 380) που δείχνει το κινηματικό ιξώδες του καυσίμου στους 50°C. Ένα παράδειγμα κατηγορίας είναι το ISO-F-RMG380, το οποίο είναι μια τυπική κατηγορία για ένα παραδοσιακό HFO. Το ISO 8217 ορίζει επίσης κατηγορίες και προδιαγραφές για τα καύσιμα απόσταξης. Αν και τα υπολειμματικά καύσιμα περιέχουν αποστάγματα για τη μείωση του ιξώδους του μίγματος καυσίμου, τα καύσιμα απόσταξης διαφέρουν στο ότι δεν περιέχουν υπολείμματα. Αντίθετα, τα καύσιμα απόσταξης αποτελούνται εξ ολοκλήρου από απόσταγμα και άλλα επεξεργασμένα κλάσματα πετρελαίου. [4]

Πίνακας 2: Προδιαγραφές ISO για κατηγορίες καυσίμων απόσταξης. [4]

| Characteristic | Unit | Limit | Category ISO-F- | | | | Test Method Reference |
|---|--------------------|-------|-------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | | | DMX | DMA ^A | DMZ ^A | DMB ^A | |
| Kinematic Viscosity at 40 °C | mm ² /s | max. | 5.50 | 6.00 | 6.00 | 11.0 | ISO 3104 |
| | mm ² /s | min. | 1.40 | 2.00 | 3.00 | 2.0 | |
| Density at 15 °C | kg/m ³ | max. | - | 890.0 | 890.0 | 900.0 | ISO 3675 or ISO 12185 |
| Cetane Index | - | min. | 45 | 40 | 40 | 35 | ISO 4264 |
| Sulfur ^B | mass % | max. | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.50 | ISO 8754 or ISO 14596, ASTM D4294 |
| Flash Point | °C | min. | 43.0 | 60.0 | 60.0 | 60.0 | ISO 2719 |
| Hydrogen sulfide | mg/kg | max. | 2.00 | | | | IP 570 |
| Acid number | mg KOH/kg | max. | 0.5 | | | | ASTM D664 |
| Total sediment by hot filtration | mass % | max. | - | - | - | 0.10 ^C | see 7.4 ISO 10307-1 |
| Oxidation Stability | g/m ³ | max. | 25 | 25 | 25 | 25 ^D | ISO 12205 |
| Carbon residue: micro method on the 10% volume distillation residue | mass % | max. | 0.30 | 0.30 | 0.30 | - | ISO 10370 |
| Carbon residue: micro method | mass % | max. | - | - | - | 0.30 | ISO 10370 |
| Cloud Point ^E | winter quality | °C | max. | -16 | report | report | - |
| | summer quality | °C | max. | -16 | - | - | - |
| Cold Filter Plugging Point ^E | winter quality | °C | | - | report | report | - |
| | summer quality | °C | max. | - | - | - | - |
| Pour point (upper) ^E | winter quality | °C | max. | - | -6 | -6 | 0 |
| | summer quality | °C | max. | - | 0 | 0 | 6 |
| Appearance | - | - | Clear and Bright ^F | | | | ^C |
| Water | vol % | max. | - | - | - | 0.30 ^C | ISO 3733 |
| Ash | mg/kg | max. | 0.010 | | | | ISO 6245 |
| Lubricity, corrected wear scar diameter (WSD) at 60 °C ^H | µm | max. | 520 ^G | | | | ISO 12156-1 |

A. Το ISO 8217:20179(E) καθόρισε τις αντίστοιχες κατηγορίες καυσίμων DFA, DFZ και DFB με πανομοιότυπες προδιαγραφές, αλλά επέτρεψε να έχει περιεχόμενο FAME (Fattic Acid Methyl Ester) έως και 7% κατ' όγκο.

B. Ο αγοραστής ορίζει τη μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο σύμφωνα με τους σχετικούς νομοθετικούς περιορισμούς.

C. Εάν το δείγμα δεν είναι διαυγές και καθαρό, απαιτείται το συνολικό ίζημα με θερμή διήθηση και δοκιμές νερού.

D. Εάν το δείγμα δεν είναι διαυγές και καθαρό, η δοκιμή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί και επομένως το όριο σταθερότητας στην οξείδωση δεν μπορεί να καθοριστεί.

E. Το σημείο ροής δεν εγγυάται τη λειτουργικότητα σε όλα τα κλίματα. Ο αγοραστής θα πρέπει να επιβεβαιώσει ότι το σημείο ροής, το σημείο νέφους και το σημείο απόφραξης του ψυχρού φίλτρου είναι κατάλληλα για το σχεδιασμό του πλοίου και το προβλεπόμενο ταξίδι.

F. Εάν το δείγμα είναι βαμμένο και δεν είναι διαφανές, τότε εφαρμόζεται το όριο νερού.

G. Η απαίτηση αυτή ισχύει για καύσιμα με περιεκτικότητα σε θείο κάτω από 500 mg/kg (0,050 % κατά βάρος).

Πίνακας 3: Προδιαγραφές ISO για κατηγορίες υπολειμματικών καυσίμων. [4]

| Characteristic | Unit | Limit | Category ISO-F- | | | | | | | | | | | Test Method Reference | |
|---|--------------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------------------------------------|----------|
| | | | RMA | RMB | RMD | RME | RMG | | | | RMK | | | | |
| | | | 10 | 30 | 80 | 180 | 180 | 380 | 500 | 700 | 380 | 500 | 700 | | |
| Kinematic Viscosity at 50 °C | mm ² /s | max. | 10.00 | 30.00 | 80.00 | 180.0 | 180.0 | 380.0 | 500.0 | 700.0 | 380.0 | 500.0 | 700.0 | ISO 3104 | |
| Density at 15 °C | kg/m ³ | max. | 920.0 | 960.0 | 975.0 | 991.0 | 991.0 | | | | 1010.0 | | | ISO 3675 or ISO 12185 | |
| CCAI | - | max. | 850 | 860 | 860 | 860 | 870 | | | | 870 | | | | |
| Sulfur ^A | mass % | max. | Statutory requirements | | | | | | | | | | | ISO 8754 or ISO 14596 or ASTM D4294 | |
| Flash Point | °C | min. | 60.0 | | | | | | | | | | | ISO 2719 | |
| Hydrogen sulfide | mg/kg | max. | 2.00 | | | | | | | | | | | IP 570 | |
| Acid number ^B | mg KOH/kg | max. | 2.5 | | | | | | | | | | | ASTM D664 | |
| Total sediment (aged) | mass % | max. | 0.10 | | | | | | | | | | | ISO 10307-2 | |
| Carbon residue: micro method | mass % | max. | 2.5 | 10.00 | 14.00 | 15.00 | 18.00 | | | | 20.00 | | | ISO 10370 | |
| Pour point (upper) ^C | winter | °C | max. | 0 | 0 | 30 | 30 | 30 | | | | 30 | | | ISO 3016 |
| | summer | °C | max. | 6 | 6 | | | | | | | | | | ISO 3016 |
| Water | vol % | max. | 0.30 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | | | | 0.50 | | | ISO 3733 | |
| Ash | mg/kg | max. | 0.040 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.100 | | | | 0.150 | | | ISO 6245 | |
| Vanadium | mg/kg | max. | 50 | 150 | 150 | 150 | 350 | | | | 450 | | | IP 501, IP 470, or ISO 14597 | |
| Sodium | mg/kg | max. | 50 | 100 | 100 | 50 | 100 | | | | 100 | | | IP 501, IP 470 | |
| Aluminum plus silicon | mg/kg | max. | 25 | 40 | 40 | 50 | 60 | | | | 60 | | | IP 501, IP 470 or ISO 10478 | |
| Used Lubricating Oils: calcium and zinc or calcium and phosphorus | mg/kg | - | calcium > 30 and zinc > 15 or calcium >30 and phosphorus > 15 | | | | | | | | | | | IP 501 or IP 470, IP 500 | |

- A. Ο αγοραστής ορίζει τη μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο σύμφωνα με τους σχετικούς νομοθετικούς περιορισμούς.
- B. Σύμφωνα με το Παράρτημα Ε του προτύπου, ISO 8217:2017(E).
- C. Ο αγοραστής πρέπει να επιβεβαιώσει ότι αυτό το σημείο ροής είναι κατάλληλο για την προβλεπόμενη περιοχή λειτουργίας.

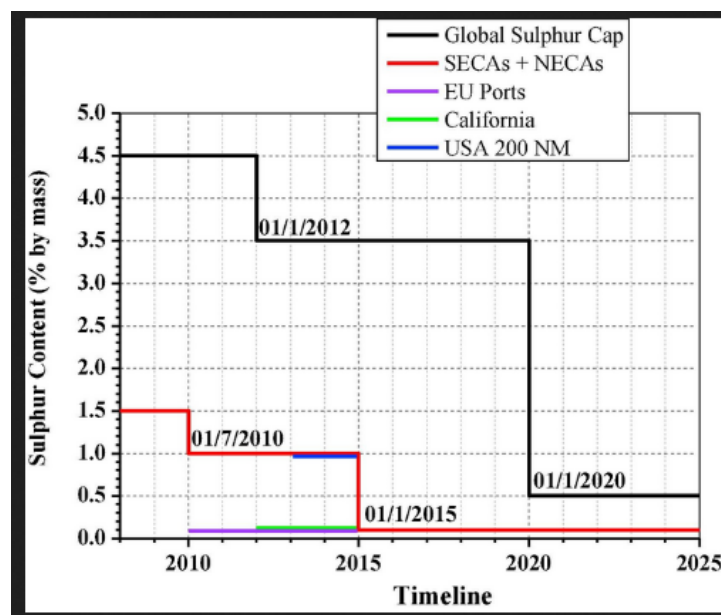
2.3 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Οι εκπομπές ρύπων των πλοίων που συμβάλλουν περισσότερο στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον είναι τα οξείδια του θείου, τα οξείδια του αζώτου και τα μικροσωματίδια. Άλλες εκπομπές πλοίων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το οξείδιο του άνθρακα είναι αέρια θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHG) που έχουν επίσης σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. [8]

2.3.1 Οξείδια του Θείου (SO_x)

Στη ναυτιλία, τα οξείδια του θείου (SO_x) απελευθερώνονται στον αέρα μέσω της καύσης καυσίμων σε κινητήρες πλοίων. Η ναυτιλιακή βιομηχανία συμβάλλει περίπου στο 13% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών SO₂ [9]. Μία από τις επιπτώσεις των οξειδίων του θείου, είναι ο σχηματισμός της όξινης βροχής. Όταν αυτή καθιζάνει, βλάπτει τη χλωρίδα και οξινίζει τον υδροφόρο ορίζοντα με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η υδρόβια πανίδα. Επίσης, εντείνει τα φαινόμενα διάβρωσης σε ανθρωπογενείς κατασκευές.

Εικόνα 2: Κανονισμοί του IMO για την περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων.

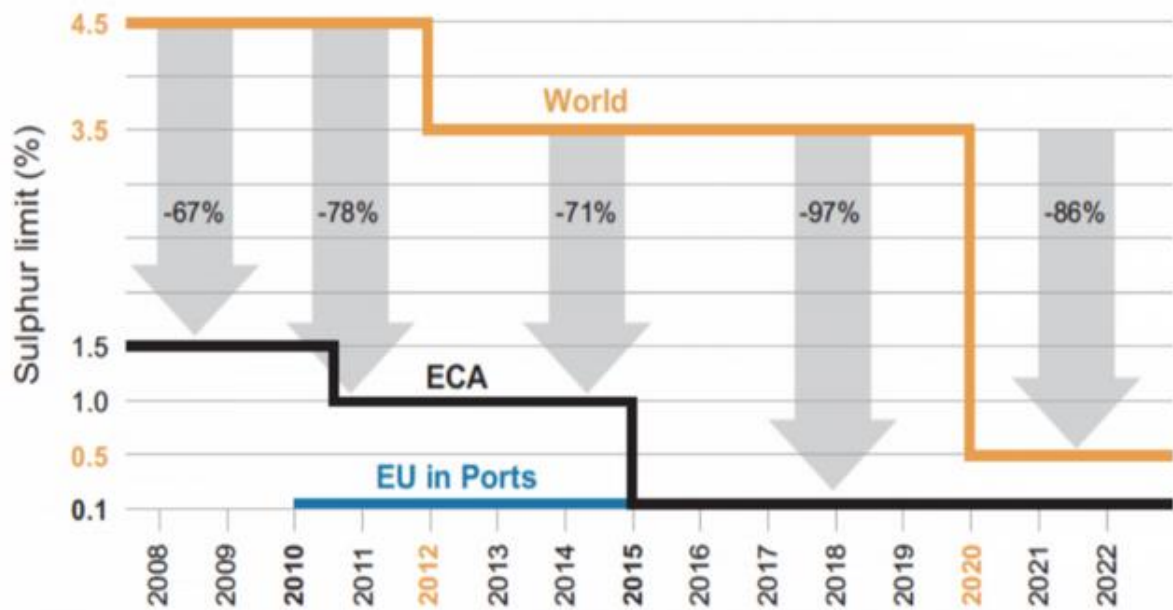


Τα οξείδια του θείου προκαλούν επίσης προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου, όπως αναπνευστικές δυσκολίες. Μία μελέτη που διεξήχθη από την Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee, MEPC), εκτίμησε ότι ο αριθμός των πρόωρων θανάτων λόγω εκπομπών οξειδίων του θείου, μεταξύ 2020 και 2025, θα είναι πάνω από 570.000. Για την πρόληψη των εκπομπών οξειδίων του θείου και τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, ο IMO άρχισε να ρυθμίζει τις εκπομπές οξειδίων του θείου ήδη από το 2005 με το

Παράρτημα VI της MARPOL. Από το 2012, η μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο στα καύσιμα πλοίων ήταν 3,5 β/β %. Η πρόσφατη οδηγία του 2020 περιορίζει το θείο στα καύσιμα πλοίων στο 0,5% κατά βάρος. Ως αποτέλεσμα, το να τηρηθεί το νέο όριο περιεκτικότητας σε θείο, γίνεται πρόκληση για τη ναυτιλιακή βιομηχανία. [10]

Εικόνα 3: Χρονολόγιο ορίων θείου. [84]

IMO Marpol Annex VI sulphur limits timeline



2.3.2 Οξείδια του Αζώτου (NO_x)

Η ναυτιλιακή βιομηχανία συμβάλλει σε ποσοστό περίπου 15% στα ανθρωπογενώς εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου. Όταν τα οξείδια του αζώτου φτάσουν στην ατμόσφαιρα, αντιδρούν παράγοντας όζον (O₃) στην τροπόσφαιρα και συμβάλλουν στην όξινη βροχή. Επιπλέον, δύναται να προκαλέσουν το φαινόμενο του ευτροφισμού βλάπτοντας τον υδροφόρο ορίζοντα. [10]

Για να ρυθμιστεί αυτό, η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος και ο IMO τροποποίησαν το παράρτημα VI MARPOL το 2008 για τη ρύθμιση της εκπομπής οξειδίων του αζώτου και οξειδίων του θείου. Οι ισχύοντες κανονισμοί βασίζονται στην ισχύ εξόδου και στην ταχύτητα του κινητήρα. Ισχύει για κινητήρες ντίζελ άνω των 130 KW. [11]

Πίνακας 4: Τα όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου ανάλογα τον τύπο και την ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα. [11]

| Όριο εκπομπών οξειδίων του αζώτου (g/kWh) | | | |
|---|---------|-----------------------|----------|
| Τύπος πλοίου | n < 130 | 130 < n < 1999 | n ≥ 2000 |
| I | 17 | $45 \times n^{-0.2}$ | 9.8 |
| II | 17.4 | $44 \times n^{-0.23}$ | 7.7 |
| III | 3.4 | $9 \times n^{-0.2}$ | 2 |

*Πλοία τύπου I: κατασκευάστηκαν μεταξύ 1ης Ιανουαρίου 2000 και 1ης Ιανουαρίου 2011,

Πλοία τύπου II: κατασκευάστηκαν μετά την 1η Ιανουαρίου 2011,

Πλοία τύπου III: κατασκευασμένα μετά την 1η Ιανουαρίου 2016.

**Όπου n, η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα (rpm)

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των πλοίων τύπου II και III, αντιστοιχούσαν το 2015 στο 35% και 14% αντίστοιχα της παγκόσμιας ναυτιλίας, ενώ 51% ήταν πλοία τύπου I, με το τελευταίο ποσοστό να παρουσιάζει μείωση με την πάροδο των ετών. [12]

2.3.3 Εκπομπές Αερίων του Θερμοκηπίου

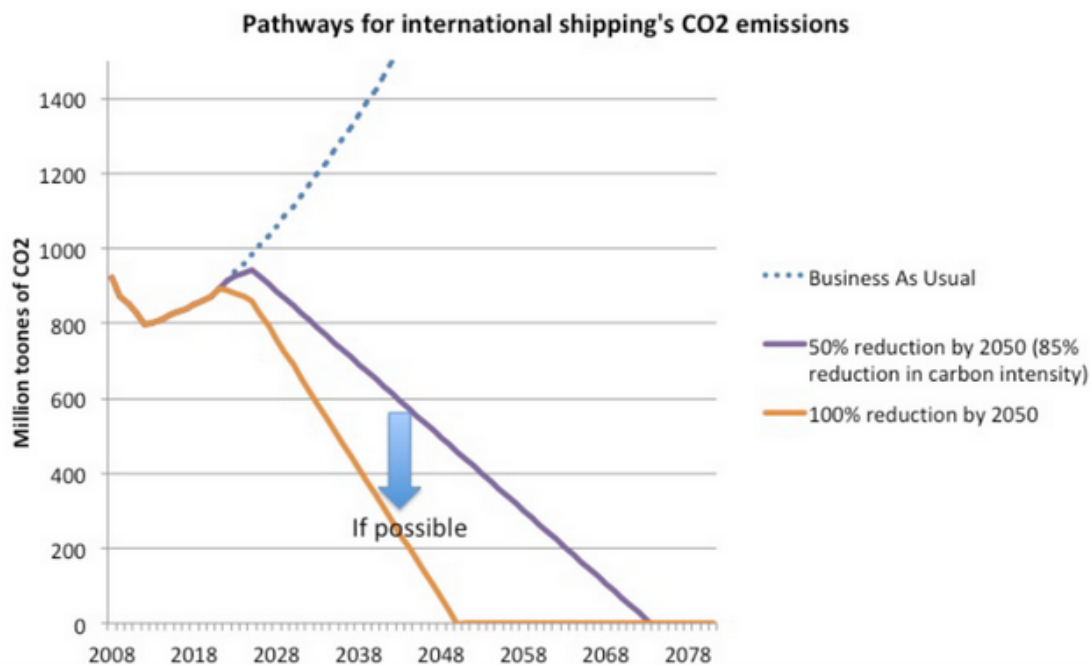
Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου έχουν αρνητικές συνέπειες για την κοινωνία γενικότερα, συμβάλλοντας στην αλλαγή του κλίματος, ενώ η συμμόρφωση στους κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών τους δημιουργεί οικονομικές επιπτώσεις σε όλους τους τομείς της κοινωνίας.

Εκτιμάται, ότι η συνολική παγκόσμια ναυτιλία εξέπεμψε 1.056 εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα το 2018, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 2,89% των συνολικών παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών για εκείνο το έτος. Σύμφωνα με μια σειρά εύλογων μακροπρόθεσμων οικονομικών και ενεργειακών σεναρίων, οι εκπομπές θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν το 90-130% των εκπομπών του 2008 έως το 2050. Από αυτή την άποψη, ο IMO έχει συμμετάσχει ενεργά σε μια παγκόσμια προσέγγιση για περαιτέρω ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου και ανάπτυξη μέτρων για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τα πλοία. [13]

Το 2018 ο IMO υιοθέτησε την στρατηγική «Initial GHG reduction strategy» για τα πλοία. Οι στόχοι της είναι η μείωση του των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τη ναυτιλίας, απαιτώντας από τα νέα πλοία να εκπέμπουν λιγότερο CO₂ ανά μεταφορικό έργο (g CO₂/dwt-nm). Στόχος είναι να μειωθεί κατά 40% έως το 2030 και 70% έως το 2050 σε σχέση με τις εκπομπές του 2008 και τελικά να επιτευχθούν οι στόχοι της Συμφωνίας του Παρισιού. Για να ανταποκριθούν σε αυτές τις

απαιτήσεις, οι κινητήρες των πλοίων θα πρέπει να λειτουργούν σε συνθήκες τέλειας καύσης, που σημαίνει ότι πρέπει να βελτιώσουν τη διαδικασία καύσης. Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο ο IMO συνιστά τη μείωση του εκπεμπόμενου CO₂ είναι οι λειτουργικές βελτιστοποιήσεις, όπως ο προγραμματισμός των ταξιδιών με βάση τον καιρό η εφαρμογή βελτιστοποιήσεων ταχύτητας και η έγκαιρες αφίξεις στα λιμάνια. [13]

Εικόνα 4: Πιθανές εξελίξεις των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από τη ναυτιλία. [85]



2.3.4 Αιωρούμενα μικροσωματίδια

Τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, αφορούν ένα μείγμα στερεών σωματιδίων και υγρών σταγονιδίων που βρίσκονται στον αέρα. Ορισμένα σωματίδια, όπως η σκόνη, η αιθάλη ή ο καπνός, είναι αρκετά μεγάλα ώστε να φαίνονται με γυμνό μάτι, υπάρχουν όμως και μικρότερα που μπορούν να ανιχνευθούν μόνο με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Αποτελούν εισπνεόμενα σωματίδια, με διαμέτρους που είναι γενικά μικρότερες από 10 μm. Τα περισσότερα σωματίδια σχηματίζονται στην ατμόσφαιρα ως δευτερογενές αποτέλεσμα ρύπων, όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου που εκπέμπονται από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα. Τα σωματίδια μπορούν να εισπνευστούν και να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα υγείας. Μερικά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μικρομέτρων μπορούν να εισχωρήσουν βαθιά στους πνεύμονες και μερικά μπορεί ακόμη και να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος. [14]

Έχει βρεθεί ότι οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων είναι μεγαλύτερες όταν χρησιμοποιείται ΗFO καθώς υπάρχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο και επομένως περισσότερες εκπομπές οξειδίων του θείου [15]. Όταν χρησιμοποιούνται υψηλότερες θερμοκρασίες, παράγονται περισσότερα οξείδια του αζώτου, και έτσι εκπέμπονται περισσότερα μικροσωματίδια. Για τη μείωση των εκπομπών τους, είναι σημαντικό να παρακολουθείται η κατανάλωση καυσίμου, η φόρτωση και οι θερμοκρασίες καύσης. Με εναλλαγή σε LSFO, οι εκπομπές μικροσωματιδίων, μειώνονται επίσης [16]. Μια άλλη επιλογή που χρησιμοποιείται είναι τα φίλτρα καταλύτη που δεσμεύουν τα σωματίδια πριν φτάσουν στο περιβάλλον.

3. Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)

3.1 Εισαγωγή

Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι τα τελευταία 100 χρόνια η επιβάρυνση του περιβάλλοντος αυξάνεται με επιταχυνόμενο ρυθμό, η διεθνής κοινότητα αναγκάζεται να ασκήσει μεγαλύτερη πίεση στις κυβερνήσεις και τη ναυτιλιακή βιομηχανία, ώστε αυτές να επιτελούν το έργο τους υπό το πρίσμα μιας «πράσινης» συνειδητοποίησης. Η παγκόσμια ναυτιλία ευθύνεται για την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ρυπογόνων ουσιών, επιβαρύνοντας τις παράκτιες περιοχές και αντιπροσωπεύοντας το 3% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Με δεδομένη τη συνεχιζόμενη ανάπτυξη του εμπορίου, φαίνεται μεγαλύτερη η αύξηση της ρύπανσης από τα πλοία και ως αποτέλεσμα ήδη γίνεται λόγος για θεσμοθέτηση αυστηρότερου πλαισίου κανονισμών. [13]

Η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα βοηθήσει στην ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων στον τομέα των ναυτιλιακών μεταφορών. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, IMO, έχει αναπτύξει μια σειρά κανόνων για την προστασία του περιβάλλοντος.

3.2 Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO)

Το 1948 μια διεθνής διάσκεψη στη Γενεύη υιοθέτησε μια σύμβαση για την επίσημη ίδρυση του IMO (το αρχικό όνομα ήταν ο Διακυβερνητικός Ναυτιλιακός Συμβουλευτικός Οργανισμός ή IMCO, αλλά το όνομα άλλαξε το 1982 σε IMO). Η Σύμβαση του IMO τέθηκε σε ισχύ το 1958 και ο νέος Οργανισμός πραγματοποίησε συνδιάσκεψη για πρώτη φορά το επόμενο έτος.

Οι σκοποί του Οργανισμού, όπως συνοψίζονται στο άρθρο 1(α) της Σύμβασης, είναι «να παρέχει μηχανισμούς συνεργασίας μεταξύ των κυβερνήσεων στον τομέα των κυβερνητικών ρυθμίσεων και πρακτικών που σχετίζονται με τεχνικά θέματα κάθε είδους που επηρεάζουν τη διεθνή εμπορική ναυτιλία, ενθαρρύνουν και διευκολύνουν τη γενική υιοθέτηση των υψηλότερων πρακτικών και προτύπων σε θέματα που αφορούν την ασφάλεια στη θάλασσα, την αποτελεσματικότητα της ναυσιπλοΐας και την πρόληψη και τον έλεγχο της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία». Ο Οργανισμός έχει επίσης την εξουσία να ασχολείται με διοικητικά και νομικά θέματα που σχετίζονται με αυτούς τους σκοπούς. Το πρώτο καθήκον του IMO ήταν να υιοθετήσει μια νέα έκδοση της Διεθνούς Σύμβασης για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS), τη σημαντικότερη από όλες τις συνθήκες που αφορούν την ασφάλεια στη θάλασσα. Αυτό επιτεύχθηκε το 1960 και ο IMO έστρεψε τότε την προσοχή του σε θέματα όπως η διευκόλυνση της διεθνούς θαλάσσιας κυκλοφορίας, οι γραμμές φόρτωσης και η μεταφορά επικίνδυνων εμπορευμάτων, ενώ αναθεωρήθηκε το σύστημα μέτρησης της χωρητικότητας των πλοίων. Όμως, παρόλο που η ασφάλεια ήταν και παραμένει η πιο σημαντική ευθύνη του IMO, ένα νέο πρόβλημα άρχισε να εμφανίζεται - η ρύπανση.

Η αύξηση της ποσότητας πετρελαίου που μεταφέρεται δια θαλάσσης και του μεγέθους των πετρελαιοφόρων ήταν ιδιαίτερα ανησυχητική και η καταστροφή του Torrey Canyon του 1967, κατά την οποία χύθηκαν 120.000 τόνοι πετρελαίου, απέδειξε το μέγεθος του προβλήματος. Κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών, ο IMO εισήγαγε μια σειρά μέτρων που αποσκοπούσαν στην πρόληψη ατυχημάτων με δεξαμενόπλοια και στην ελαχιστοποίηση των συνεπειών τους. Αντιμετώπισε επίσης την περιβαλλοντική απειλή που προκαλείται από συνήθεις εργασίες, όπως ο καθαρισμός δεξαμενών φορτίου πετρελαίου και η απόρριψη απορριμμάτων μηχανοστασίου - από άποψη χωρητικότητας μεγαλύτερη απειλή από την τυχαία ρύπανση. [17]

Το σημαντικότερο από όλα αυτά τα μέτρα ήταν η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία, του 1973, όπως τροποποιήθηκε από το σχετικό Πρωτόκολλο του 1978 (MARPOL-International Convention for the Prevention of Pollution from Ships 73/78). Η σύμβαση σχηματίστηκε ως αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο συνθηκών που εγκρίθηκαν το 1973 και 1978 αντίστοιχα και ως εκ τούτου το όνομα MARPOL 73/78. (Το «MARPOL» είναι συντομογραφία για τη θαλάσσια ρύπανση και το «73/78» είναι συντομογραφία για τα έτη 1973 και 1978). Η MARPOL 73/78 τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου 1983. Καλύπτει όχι μόνο την τυχαία και λειτουργική ρύπανση από πετρέλαιο, αλλά και τη ρύπανση από χημικά, εμπορεύματα σε συσκευασμένη μορφή, λύματα, απορρίμματα και ατμοσφαιρική ρύπανση. Η Σύμβαση του IMO βεβαιώνει ότι τα παράκτια κράτη έχουν δικαίωμα να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα για την πρόληψη, τον μετριασμό ή την εξέταση των κινδύνων για τις ακτές τους από θαλάσσια ατυχήματα. Η Διεθνής Σύμβαση για την ετοιμότητα, η απόκριση και η συνεργασία από την πετρελαϊκή ρύπανση (OPRC) του 1990 παρέχει ένα παγκόσμιο πλαίσιο για

διεθνή συνεργασία ως απάντηση σε περιστατικά μεγάλης κλίμακας ή απειλές θαλάσσιας ρύπανσης. Ένα Πρωτόκολλο της Σύμβασης (Πρωτόκολλο HNS) καλύπτει τη θαλάσσια ρύπανση από επικίνδυνες και επιβλαβείς ουσίες. Ο IMO έχει επίσης την ευθύνη της γραμματείας για τη Σύμβαση του 1972 για την Πρόληψη της Ρύπανσης των Θαλασσών από Απόρριψη Αποβλήτων και Άλλων Υλών (LDC), κοινώς γνωστή ως Σύμβαση του Λονδίνου, η οποία ενημερώθηκε από το Πρωτόκολλο του 1996. [17]

3.3 Περιβαλλοντικοί κανονισμοί

Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία προκαλεί μια σωρευτική επίδραση που συμβάλλει στα γενικά προβλήματα ποιότητας του αέρα που αντιμετωπίζουν οι πληθυσμοί σε πολλές περιοχές και επηρεάζει επίσης το φυσικό περιβάλλον, όπως η έντονη όξινη βροχή. Το παράρτημα VI της MARPOL, που εγκρίθηκε για πρώτη φορά το 1997, περιορίζει τους κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους που περιέχονται στα καυσαέρια των πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των οξειδίων του θείου (SO_x) και των οξειδίων του αζώτου (NO_x), και απαγορεύει τις σκόπιμες εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον (ODS). Το παράρτημα VI της MARPOL ρυθμίζει επίσης την αποτέφρωση στα πλοία και τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) από δεξαμενόπλοια. [18]

Μετά την έναρξη ισχύος του παραρτήματος VI MARPOL στις 19 Μαΐου 2005, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), κατά την 53^η σύνοδό της (Ιούλιος 2005), συμφώνησε να αναθεωρήσει το Παράρτημα VI MARPOL με στόχο τη σημαντική ενίσχυση των ορίων εκπομπών υπό το πρίσμα των τεχνολογικών βελτιώσεων και τη μεγαλύτερη εμπειρία προς την υλοποίηση. Ως αποτέλεσμα τριετούς εξέτασης, η 58^η σύνοδος της MEPC (Οκτώβριος 2008) ενέκρινε το αναθεωρημένο παράρτημα VI MARPOL και τον σχετικό τεχνικό κώδικα NO_x 2008, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2010. [19]

Αναθεωρημένο παράρτημα VI της MARPOL

Οι κύριες αλλαγές στο παράρτημα VI της MARPOL αφορά την προοδευτική μείωση των εκπομπών SO_x, NO_x και μικροσωματιδίων παγκοσμίως και η εισαγωγή περιοχών ελέγχου εκπομπών (Emission Control Areas, ECA) για περαιτέρω μείωση των εκπομπών αυτών των ατμοσφαιρικών ρύπων σε καθορισμένες θαλάσσιες περιοχές. Βάσει του αναθεωρημένου παραρτήματος VI της MARPOL, το παγκόσμιο όριο περιεκτικότητας σε θείο θα μειωθεί από το προηγούμενο 3,50% σε 0,50%, με ισχύ από την 1η Ιανουαρίου 2020. Η 70^η διάσκεψη της MEPC (Οκτώβριος 2016) εξέτασε μια αξιολόγηση

της διαθεσιμότητας του μαζούτ για να ενημερώσει την απόφαση που θα λάβουν τα μέρη του παραρτήματος VI της MARPOL και αποφάσισε ότι για το πρότυπο μαζούτ ο νέος κανονισμός (όριο περιεκτικότητας θείου 0,50%) θα τεθεί σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2020. [19]

| Παράρτημα MARPOL 73/78 | Ημερομηνία που τέθηκε σε ισχύ | Αριθμός κρατών που το έχουν επικυρώσει | % παγκόσμιας χωρητικότητας |
|------------------------|-------------------------------|--|----------------------------|
| I/II | 2/10/1983 | 153 | 98,52 |
| III | 1/7/1992 | 141 | 97,79 |
| IV | 27/9/2003 | 134 | 90,74 |
| V | 31/12/1988 | 147 | 98,03 |
| VI | 19/5/2005 | 80 | 95,23 |

Τα έξι παραρτήματα της MARPOL 73/78, η ημερομηνία που τέθηκαν σε ισχύ και ο αριθμός κρατών και το ποσοστό της χωρητικότητας της παγκόσμιας ναυτιλίας που τα έχουν επικυρώσει τον Απρίλιο 2015.

(ΠΗΓΗ: IMO (1997).MARPOL 73/78, Consolidated Edition. London: IMO.)

3.4 Ο Κανονισμός IMO 2020

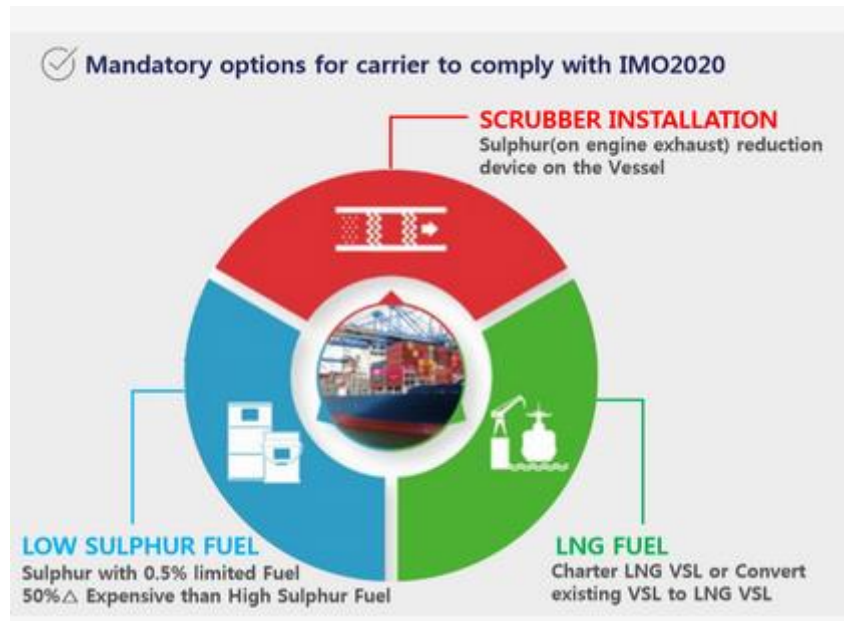
Την 1η Ιανουαρίου 2020, τέθηκε σε ισχύ ένα νέο όριο για την περιεκτικότητα σε θείο στο μαζούτ που χρησιμοποιείται στα πλοία, σηματοδοτώντας ένα σημαντικό ορόσημο για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, τη διατήρηση του περιβάλλοντος και την προστασία της ανθρώπινης υγείας.

Γνωστός ως «IMO 2020», ο κανονισμός περιορίζει το θείο στο μαζούτ που χρησιμοποιείται στα πλοία που λειτουργούν εκτός καθορισμένων περιοχών ελέγχου εκπομπών σε 0,50% κατά βάρος σημαντική μείωση από το προηγούμενο όριο του 3,5% κατά βάρος. Σε συγκεκριμένες καθορισμένες περιοχές ελέγχου εκπομπών τα όρια ήταν ήδη αυστηρότερα (0,10% κατά βάρος). Αυτό το νέο όριο κατέστη υποχρεωτικό μετά από τροποποίηση του Παραρτήματος VI της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL). Η προκύπτουσα μείωση των εκπομπών οξειδίου του θείου (SOx) από τα πλοία έχει σημαντικά οφέλη για την υγεία και το περιβάλλον για τον κόσμο, ιδιαίτερα για τους πληθυσμούς που ζουν κοντά σε λιμάνια και ακτές. Τα οξείδια του θείου είναι επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας αναπνευστικές, καρδιαγγειακές και πνευμονοπάθειες. Μόλις απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, το SOx μπορεί να οδηγήσει σε όξινη βροχή, η οποία επηρεάζει τις καλλιέργειες, τα δάση και τα υδρόβια είδη και συμβάλλει στην οξίνιση των ωκεανών. [20]

Πριν από την έναρξη ισχύος του νέου ορίου, τα περισσότερα πλοία χρησιμοποιούσαν βαρύ μαζούτ. Προερχόμενο ως υπόλειμμα από την απόσταξη αργού πετρελαίου, το βαρύ μαζούτ είχε πολύ υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο το οποίο, μετά την καύση στον κινητήρα, κατέληγε στις εκπομπές

των πλοίων. Τώρα, η συντριπτική πλειονότητα των πλοίων χρησιμοποιεί μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (VLSFO) για να συμμορφωθεί με το νέο όριο και μέχρι σήμερα δεν έχουν αναφερθεί προβλήματα ασφάλειας στον IMO. [20]

Εικόνα 5: Υποχρεωτικές επιλογές για συμμόρφωση με τον IMO 2020. [86]



Πιο συγκεκριμένα, το αναθεωρημένο Παράρτημα VI της MARPOL, που έχει υιοθετηθεί από τον IMO, στο Κεφάλαιο 3: «Απαιτήσεις για τον έλεγχο των εκπομπών από τα πλοία», αναφέρει τον κανονισμό 14:

«Κανονισμός 14 - Οξείδια του θείου (SO_x)

Γενικές Προϋποθέσεις

(1) Η περιεκτικότητα σε θείο οποιουδήποτε ναυτιλιακού καυσίμου που χρησιμοποιείται στα πλοία δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,5% κατά βάρος.

(2) Η παγκόσμια μέση περιεκτικότητα σε θείο των υπολειμματικών ναυτιλιακών καυσίμων που παρέχονται για χρήση επί των πλοίων, θα παρακολουθείται λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθυντήριες γραμμές που θα αναπτυχθούν από τον Οργανισμό.

Απαιτήσεις εντός των περιοχών ελέγχου εκπομπών SO_x

(3) Για τους σκοπούς του παρόντος κανονισμού, οι περιοχές ελέγχου εκπομπών SO_x περιλαμβάνουν:

α) την περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας, όπως ορίζεται στον Κανονισμό 10, Παράγραφος 1, Στοιχείο β) του Παραρτήματος Ι,

β) την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας όπως ορίζεται στον Κανονισμό 5, Παράγραφος 1, Στοιχείο στ) του Παραρτήματος V,

γ) οποιαδήποτε άλλη θαλάσσια περιοχή, συμπεριλαμβανομένων των λιμενικών περιοχών, που ορίζονται από τον Οργανισμό σύμφωνα με κριτήρια και διαδικασίες για τον καθορισμό περιοχών ελέγχου εκπομπών SO_x όσον αφορά την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από πλοία που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα ΙΙΙ.

(4) Ενώ τα πλοία βρίσκονται εντός περιοχές ελέγχου εκπομπών SO_x, πρέπει να πληρούνται τουλάχιστον μία από τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

α) Η περιεκτικότητα σε θείο του μαζούτ που χρησιμοποιείται στα πλοία σε SO_x η περιοχή ελέγχου εκπομπών δεν υπερβαίνει το 0,1% κατά βάρος.

(β) Το σύστημα καθαρισμού καυσαερίων, εγκεκριμένο από τις Αρχές λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθυντήριες γραμμές που θα αναπτυχθούν από τον Οργανισμό, εφαρμόζεται για τη μείωση της συνολικής εκπομπής οξειδίων του θείου από τα πλοία, συμπεριλαμβανομένων τόσο των βοηθητικών όσο και των κύριων κινητήρων πρόωσης, έως 6,0g SO_x/kW·h ή λιγότερο, υπολογιζόμενο ως το συνολικό βάρος της εκπομπής διοξειδίου του θείου. Τα ρεύματα αποβλήτων από τη χρήση αυτού του εξοπλισμού δεν πρέπει να απορρίπτονται σε κλειστά λιμάνια και εκβολές ποταμών, εκτός εάν μπορεί να τεκμηριωθεί πλήρως από το πλοίο ότι τέτοια ρεύματα αποβλήτων δεν έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στα οικοσυστήματα τέτοιων λιμένων και εκβολών ποταμών, με βάση κριτήρια που κοινοποιούν οι αρχές του κράτους λιμένα στον Οργανισμό. Ο Οργανισμός θα διανείμει τα κριτήρια σε όλα τα Μέρη της Σύμβασης.

(γ) Οποιαδήποτε άλλη τεχνολογική μέθοδος που είναι επαληθεύσιμη και εκτελέσιμη για τον περιορισμό των εκπομπών SO_x σε επίπεδο ισοδύναμο με αυτό που περιγράφεται στην υποπαράγραφο (β). Αυτές οι μέθοδοι εγκρίνονται από τη Διοίκηση λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθυντήριες γραμμές που αναπτύσσονται από τον Οργανισμό.

(5) Η περιεκτικότητα του μαζούτ σε θείο που αναφέρεται στην Παράγραφο (1) και στην Παράγραφο (4)(α) του παρόντος κανονισμού τεκμηριώνεται από τον προμηθευτή όπως απαιτείται από τον Κανονισμό 18 του παρόντος παραρτήματος.

(6) Τα πλοία που χρησιμοποιούν διαφορετικού τύπου μαζούτ για να συμμορφωθούν με την Παράγραφο (4), Στοιχείο α) του παρόντος κανονισμού πρέπει να αφήνουν επαρκή χρόνο να

ξεπλένονται τα συστήματα παροχής καυσίμου από όλα τα καύσιμα που η περιεκτικότητά τους σε θείο υπερβαίνει το 0,1% κατά βάρος πριν από την είσοδο σε περιοχή ελέγχου εκπομπών SOx. Ο όγκος των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (μικρότερη ή ίση με 0,1% κατά βάρος περιεκτικότητα σε θείο) σε κάθε δεξαμενή καθώς και η ημερομηνία, η ώρα και η θέση του πλοίου, όταν ολοκληρώνεται οποιαδήποτε εργασία αλλαγής καυσίμου, θα καταγράφονται σε αυτό το ημερολόγιο βιβλίο όπως ορίζεται από τη Διοίκηση.

(7) Κατά τους πρώτους 12 μήνες αμέσως μετά την έναρξη ισχύος του παρόντος Πρωτοκόλλου ή μια τροποποίηση του παρόντος Πρωτοκόλλου που ορίζει μια συγκεκριμένη περιοχή ελέγχου εκπομπών SOx σύμφωνα με την Παράγραφο (3), Στοιχείο β) του παρόντος κανονισμού, πλοία που εισέρχονται σε περιοχή ελέγχου εκπομπών SOx που αναφέρονται στην Παράγραφο (3), Στοιχείο α) του παρόντος κανονισμού ή που ορίζεται σύμφωνα με την Παράγραφο (3), Στοιχείο β) του παρόντος κανονισμού εξαιρούνται από τις απαιτήσεις των Παραγράφων (4) και (6) του παρόντος κανονισμού και από τις απαιτήσεις της Παραγράφου (5) του παρόντος κανονισμού, εφόσον αφορούν την Παράγραφο (4)(α) του παρόντος κανονισμού.». [21]

4. Επιπτώσεις του κανονισμού IMO 2020

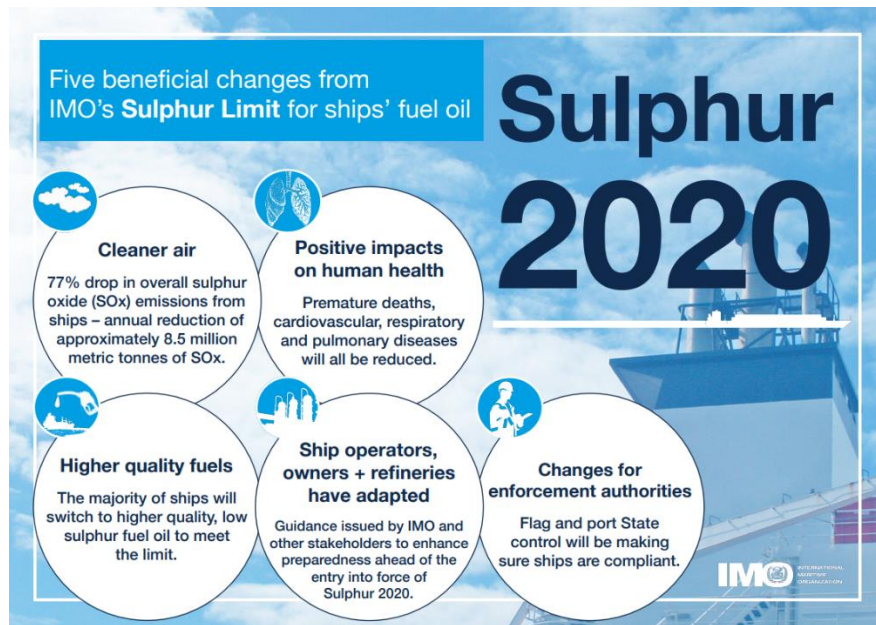
Βιώνοντας μια σημαντική μείωση του ορίου περιεκτικότητας σε θείο του μαζούτ για πλοία που εκτελούν δρομολόγια εκτός καθορισμένων περιοχών ελέγχου εκπομπών: από 3,50% κατά βάρος σε 0,50% κατά βάρος. Υπάρχει ένα ακόμη αυστηρότερο όριο 0,10% κατά βάρος σε ισχύ στις περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECAs) που έχουν θεσπιστεί από τον IMO. Οι τέσσερις περιοχές ελέγχου εκπομπών περιλαμβάνουν: την περιοχή της Βαλτικής Θάλασσας, την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας, την περιοχή της Βόρειας Αμερικής (που καλύπτει καθορισμένες παράκτιες περιοχές ανοιχτά των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά) και τη περιοχή της Καραϊβικής Θάλασσας των Ηνωμένων Πολιτειών (γύρω από το Πουέρτο Ρίκο και τις Παρθένες Νήσους των Ηνωμένων Πολιτειών).

Το 2022, το MEPC 78 συμφώνησε να ορίσει ολόκληρη τη Μεσόγειο Θάλασσα ως περιοχή ελέγχου εκπομπών, πράγμα που σημαίνει ότι τα πλοία θα πρέπει - από το 2025 - να συμμορφώνονται με πιο αυστηρούς ελέγχους για τις εκπομπές οξειδίου του θείου. Η επιτροπή ενέκρινε τις προτεινόμενες τροπολογίες στο παράρτημα VI MARPOL, με σκοπό την έγκριση στο MEPC 79, το οποίο θα ορίζει τη Μεσόγειο Θάλασσα, στο σύνολό της, ως Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών Οξειδίων του Θείου (SOx-ECA) και σωματιδίων. Η τροποποίηση θα μπορούσε να τεθεί σε ισχύ στα μέσα του 2024, με το νέο όριο να τίθεται σε ισχύ από το 2025. [20]

Σύμφωνα με τον ίδιο τον IMO, οι πέντε κυριότερες συνέπειες με θετικό πρόσημο, του κανονισμού του 2020 αφορούν:

1. Καθαρότερη ατμόσφαιρα: Πρόβλεψη για 77% μείωση στις εκπομπές οξειδίων του θείου από την παγκόσμια ναυτιλία.
2. Οφέλη στην ανθρώπινη υγεία: Πρόβλεψη για μείωση των πρόωρων θανάτων και παθήσεων, σχετιζόμενων άμεσα ή έμμεσα με εκπομπές ρύπων.
3. Υψηλότερης ποιότητας καύσιμα: Με σκοπό να ανταπεξέλθουν στις νέες απαιτήσεις, τα πλοία θα αναγκάζονται χρησιμοποιούν υψηλότερης ποιότητας καύσιμα.
4. Συμμόρφωση των εμπλεκόμενων πλευρών: Με την καθοδήγηση του IMO, είναι εφικτή η άμεση προσαρμογή όλων των παραγόντων (διυλιστήρια, ιδιοκτήτες πλοίων, χειριστές).
5. Αλλαγές για τις ελεγκτικές αρχές: Οι αρμόδιες, για τον έλεγχο ως προς τη συμμόρφωση με τους νέους κανονισμούς, αρχές, θα είναι σε θέση να βεβαιώνουν την τήρηση των νέων Κανονισμών. [20]

Εικόνα 6: Οι 5 κυριότερες θετικές αλλαγές από τον κανονισμό του 2020, σύμφωνα με τον IMO. [20]



4.1 Επιπτώσεις του IMO 2020 στη ναυτιλία

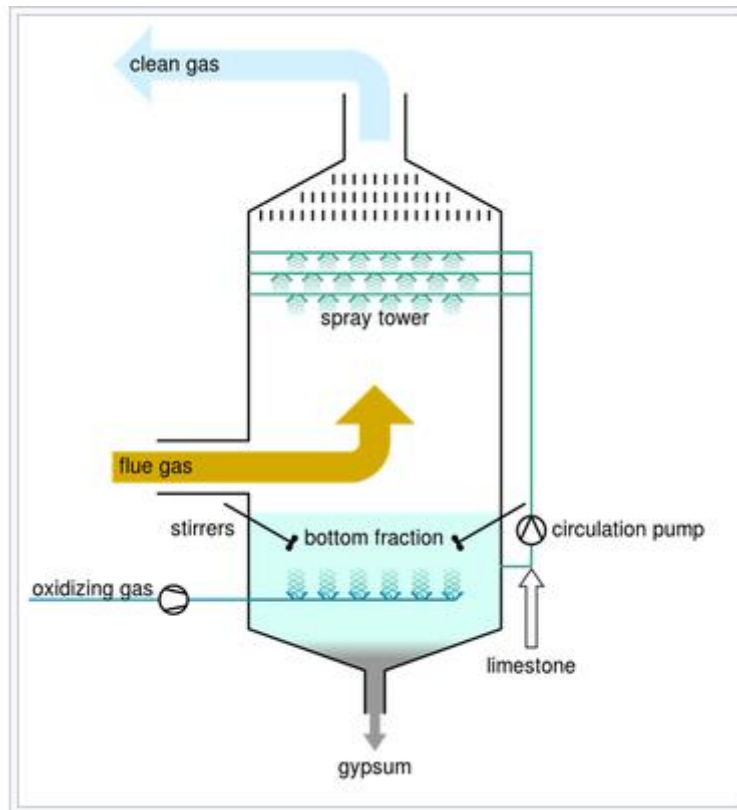
4.1.1 Οι τρεις Πολιτικές Συμμόρφωσης

Η πρώτη εγκεκριμένη από τον IMO πολιτική συμμόρφωσης με τον IMO 2020 που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα πλοία είναι η κατανάλωση ναυτιλιακών καυσίμων που η περιεκτικότητά τους σε θείο ακολουθεί της προδιαγραφές του κανονισμού του IMO. Για την παραγωγή μαζούτ συμβατών με τον IMO στη ναυτιλιακή βιομηχανία, τα διυλιστήρια πετρελαίου μπορούν είτε να παράγουν μαζούτ με περιεκτικότητα σε θείο 0,50% β/β, είτε να αναμειγνύουν το πετρέλαιο μαζούτ υψηλής περιεκτικότητας σε θείο με μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Πρόσθετα μπορούν επίσης να προστεθούν στα ναυτιλιακά καύσιμα που πληρούν τις προδιαγραφές θείου του IMO για τη βελτίωση της λιπαντικής ικανότητας και άλλων ιδιοτήτων του καυσίμου.

Η δεύτερη εγκεκριμένη από τον IMO πολιτική συμμόρφωσης με τον IMO 2020 που δύναται να ακολουθήσουν τα πλοία είναι η εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων, γνωστών και ως πλυντρίδες (scrubbers), τα οποία είναι βασικά συσκευές μείωσης. Οι πλυντρίδες έχουν σχεδιαστεί για να αφαιρούν τα οξείδια του θείου από τα καυσαέρια των σκαφών. Κατά συνέπεια, ένα πλοίο εξοπλισμένο με πλυντρίδες μπορεί να εξακολουθεί να χρησιμοποιεί μαζούτ με περιεκτικότητα σε θείο υψηλότερη από το αποδεκτό όριο μετά την 1η Ιανουαρίου 2020, επειδή οι εκπομπές SOx του μπορούν να πληρούν το όριο περιεκτικότητας σε θείο που απαιτείται από τον IMO 2020.

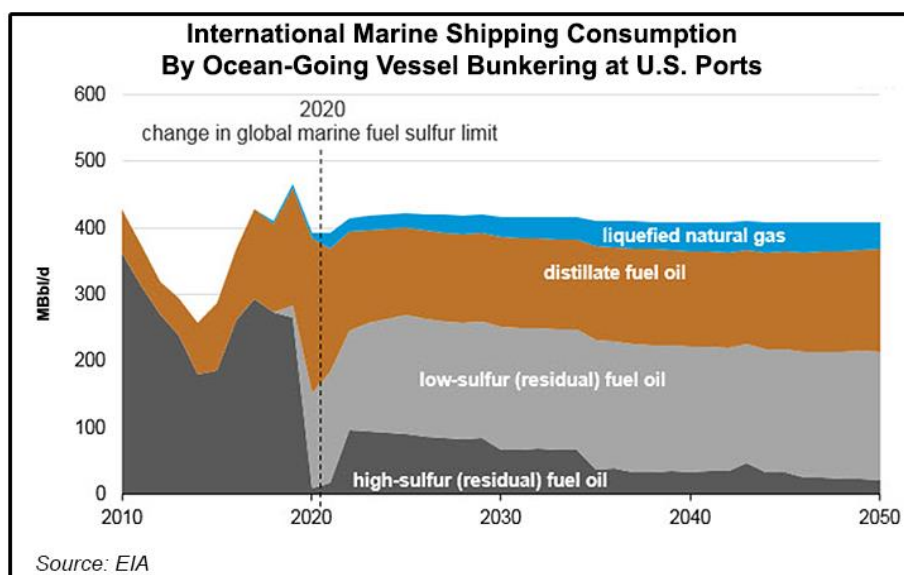
Συγκεκριμένα, ο κανονισμός του IMO 2020 επιτρέπει στις αρχές των κρατών σημαίας να εγκρίνουν οποιοδήποτε «εξάρτημα, υλικό ή συσκευή που πρόκειται να τοποθετηθεί σε πλοίο ή άλλες διαδικασίες, εναλλακτικά πετρέλαια μαζούτ ή μέθοδοι συμμόρφωσης που χρησιμοποιούνται εναλλακτικά σε αυτό που απαιτείται» που «είναι τουλάχιστον εξίσου αποτελεσματικές από την άποψη της μείωσης εκπομπών όπως απαιτείται» από τον IMO 2020.

Εικόνα 7: Διάγραμμα συστήματος πλυντρίδας. [87]



Τέλος, η τρίτη εγκεκριμένη από τον IMO πολιτική είναι να είναι εξοπλισμένα με κινητήρες ειδικά σχεδιασμένους για να καταναλώνουν διαφορετικούς τύπους καυσίμων, όπως υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), μεθανόλη ή βιοκαύσιμα που περιέχουν χαμηλή ή μηδενική ποσότητα θείου. [22]

Εικόνα 8: Χρήση διαφορετικών τύπων ναυτιλιακών καυσίμων πριν και μετά την εφαρμογή του IMO 2020. [50]



4.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών επιλογών

Καθώς ορισμένες εταιρείες εκμετάλλευσης πλοίων προτιμούν να αλλάζουν από καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για τον εφοδιασμό τους. Πρώτον, το γενικό καύσιμο (IFO 180/380) μπορεί να αναμιχθεί με καύσιμο χωρίς θείο για να μειωθεί η συνολική περιεκτικότητα σε θείο. Μια άλλη μέθοδος περιλαμβάνει την άμεση χρήση αργού πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο για την παραγωγή καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Η πρώτη επιλογή αποτελεί την οικονομικότερη, αλλά μπορεί να φθείρει τους υπάρχοντες κινητήρες, οι οποίοι αρχικά σχεδιάστηκαν για το παραδοσιακό βαρύ μαζούτ (HFO). Το τελευταίο ευνοεί τις συνθήκες λειτουργίας των συμβατικών κινητήρων πλοίων, αλλά είναι πιο κοστοβόρο λόγω της περιορισμένης προσφοράς στην αγορά. [23]

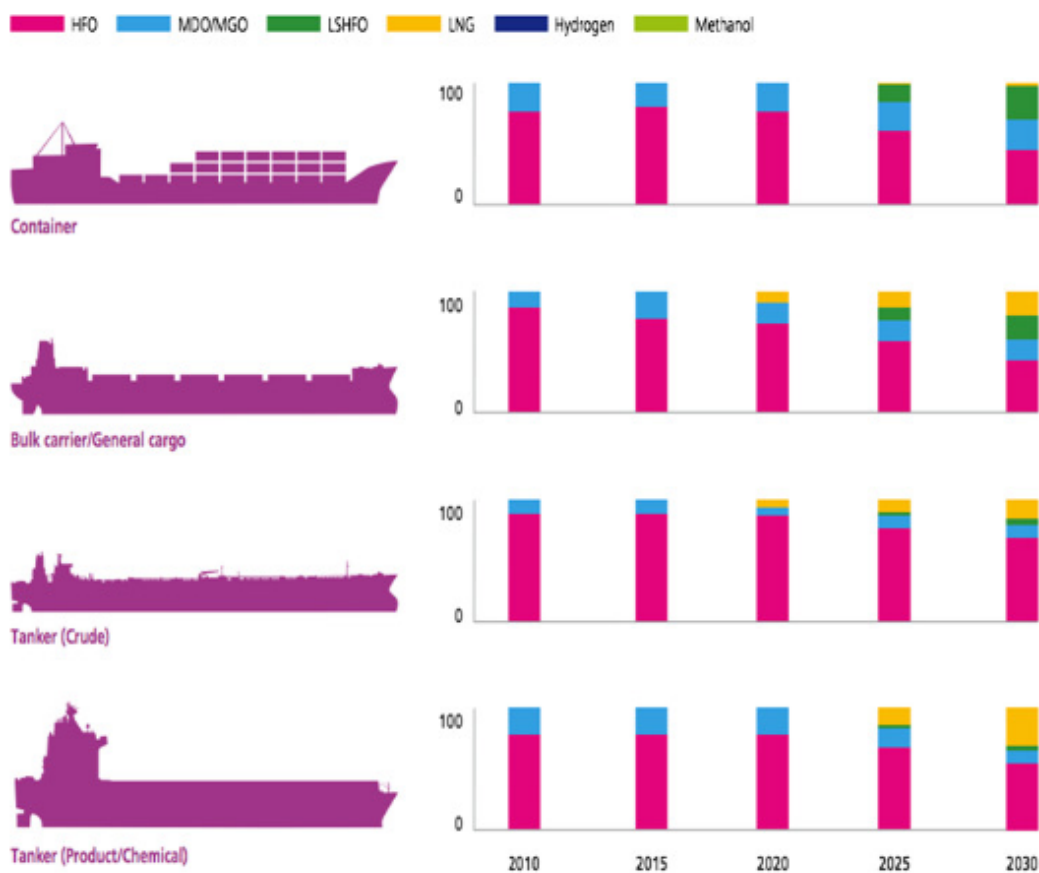
Στις 8 Σεπτεμβρίου 2019, η Maersk ανακοίνωσε τη συνεργασία της με την Koole Terminals για την παραγωγή καυσίμων πλοίων 0,5% σε θείο στο Ρότερνταμ για να συμμορφωθεί με το ανώτατο όριο θείου του IMO 2020, και ως εκ τούτου, μείωσε την κατανάλωση φυσικού αερίου και μαζούτ με βάση την τιμή κατά 0,1%. Εκτός από τη Maersk, η HaragLloyd και η Orient Overseas Container Line είχαν στραφεί επίσης σε καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο για να διασφαλίσουν τη συμμόρφωση έως το 2020. [23]

Η στροφή σε καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο προτιμάται πιο συχνά από τις πλυντρίδες ή το υγροποιημένο φυσικό αέριο, LNG, λόγω των μικρότερων προσαρμογών που απαιτούνται και το ελάχιστο κόστος κεφαλαίου. [24]

Οι φορείς εκμετάλλευσης πλοίων που επιλέγουν αυτόν τον τύπο συμμόρφωσης δεν χρειάζεται να μετασκευάσουν τα υπάρχοντα πλοία τους, ενώ ελάχιστες προσαρμογές στις δεξαμενές και τους κινητήρες είναι επαρκείς. Αν και το αρχικό κόστος εγκατάστασης για την αλλαγή καυσίμου είναι χαμηλό, οι επιχειρήσεις επιβαρύνονται με σημαντικά υψηλότερο λειτουργικό κόστος μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. [25].

Αυτά τα λειτουργικά κόστη είναι κυρίως λόγω της υψηλής διαφοράς τιμής μεταξύ καυσίμων χαμηλής και υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. [23]

Εικόνα 9: Μίγμα καυσίμου για διάφορους τύπους πλοίων. HFO = Heavy Fuel Oil; MDO/MGO = Marine Diesel/Gas Oil; LSHFO = Low Sulfur Heavy Fuel Oil; LNG = Liquefied Natural Gas.



Ορισμένοι διαχειριστές πλοίων προτιμούν την εγκατάσταση πλυντρίδων—όπως η Star Bulk, η Safe Bulkers και η Spliethoff—και συνεχίζουν να χρησιμοποιούν καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Είναι έτοιμοι να ανεχθούν το σημαντικό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης για να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν λιγότερο το ακριβό μαζούτ HFO. [23]

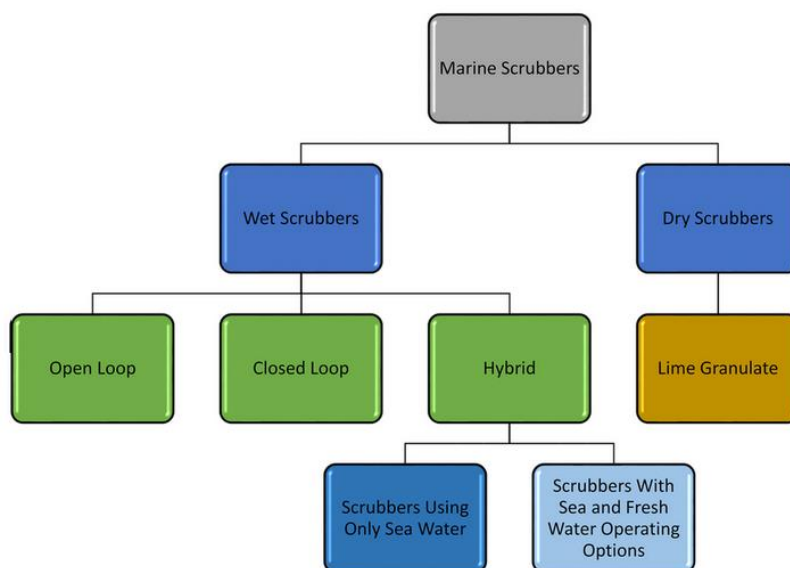
Οι πλυντρίδες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο τύπους, υγρές και ξηρές. Οι υγρές θεωρούνται πιο κατάλληλες για εφαρμογές σε πλοία από τις ξηρές και περιλαμβάνουν τρεις τύπους: ανοιχτούς, κλειστούς και υβριδικούς βρόχους. [23]

Ο κλειστός βρόχος αποτελεί την πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή μεταξύ αυτών επειδή προστίθεται ένα διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου για την επεξεργασία καθαρού νερού αντί για θαλασσινό νερό, το οποίο χρησιμοποιείται στους ανοιχτούς βρόχους ως μέσο καθαρισμού για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της αποσύνθεσης. [24]

Ένας υβριδικός βρόχος συνδυάζει ανοιχτά και κλειστά συστήματα για να επιτρέψει στα πλοία να χρησιμοποιούν συστήματα κλειστού βρόχου σε περιοχές ελέγχου εκπομπών και στη συνέχεια να μεταβούν σε ανοιχτά συστήματα εκτός αυτών των περιοχών για να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα και των δύο τύπων. Περαιτέρω, η Clarkson Research Services δείχνει ότι ο ανοιχτός βρόχος είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος, ακολουθούμενος από τον υβριδικό και τον κλειστό. [23]

Ωστόσο, οι εγκαταστάσεις πλυντριδών έχουν επίσης κάποια προφανή μειονεκτήματα. Πρώτον, απαιτούν εξαιρετικά υψηλό κόστος επένδυσης για τη μετασκευή μεγάλων τεμαχίων εξοπλισμού, ασκώντας σημαντική πίεση στις ταμειακές ροές του διαχειριστή του πλοίου. Επίσης, ένα πλοίο θα πρέπει να παραμείνει μη λειτουργικό κατά τη διάρκεια της μετασκευής, γεγονός που μειώνει τις ημέρες λειτουργίας του καθώς και το εισόδημα που δημιουργείται. Επιπλέον, η εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού επηρεάζει αρνητικά την ικανότητα μεταφοράς ωφέλιμων φορτίων των πλοίων, λόγω του μεγάλου όγκου διατάξεων που έχουν εγκατασταθεί. [25]

Εικόνα 10: Οι διαφορετικές κατηγορίες συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων. [51]



Οι εγκαταστάσεις συστημάτων καθαρισμού είναι πιο ελκυστικές για τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων επειδή αυτό τους επιτρέπει να αποφεύγουν την αγορά ακριβών καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. [23]

Σε σύγκριση με τις πλυντρίδες και τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, λίγες ναυτιλιακές εταιρείες επιλέγουν την τρίτη επιλογή, το υγροποιημένο φυσικό αέριο, LNG. Αυτό συμβαίνει επειδή το LNG έχει μικρότερο μερίδιο αγοράς δεδομένων των υψηλών αρχικών επενδύσεων και των ανεπαρκών εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού που κατασκευάζονται σε λιμάνια παγκοσμίως, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ευρεία εφαρμογή του LNG. Αυτές οι αρχικές επενδύσεις προέρχονται κυρίως από την τροποποίηση των κινητήρων, των δεξαμενών καυσίμων και των αισθητήρων αερίου των πλοίων, μεταξύ άλλων. [25]

Επιπλέον, οι δεξαμενές LNG απαιτούν περισσότερο χώρο από τις παραδοσιακές δεξαμενές καυσίμων επειδή το LNG είναι λιγότερο πυκνό από τα στερεά καύσιμα. Έχει υπολογιστεί πως ένα φορτηγό πλοίο μπορεί να χάσει έως και το 3,5% του ωφέλιμου προς φόρτωση χώρου, λόγω των δεξαμενών LNG [26].

Ωστόσο, η θερμότητα δύναμη του LNG είναι περισσότερο από 20% υψηλότερη από αυτή των παραδοσιακών ναυτιλιακών καυσίμων, γεγονός το οποίο μπορεί να μειώσει σημαντικά το λειτουργικό κόστος επειδή στην περίπτωση του LNG καταναλώνονται λιγότερα καύσιμα. [23]

Επιπλέον, το LNG είναι δημοφιλές λόγω της πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, καθώς μπορεί να μειώσει από 90% έως 99% τις εκπομπές SO_x και από 60% έως 85% τις εκπομπές μικροσωματιδίων, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα όπως το IFO 180 ή το 380. [25]

4.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή

Οι υπάρχουσες σχετικές μελέτες υποδεικνύουν ότι πολλοί παράγοντες - όπως η ηλικία του πλοίου, η τιμή των προθεσμιακών συμβάσεων καυσίμου και η κατανάλωση καυσίμου, μεταξύ άλλων, επηρεάζουν τη μέθοδο συμμόρφωσης του φορέα εκμετάλλευσης του πλοίου με τον κανονισμό του IMO για το θείο το 2020.

Σύμφωνα με τους Lindstad et al. (2015), η βέλτιστη στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών SO_x πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τόσο την ετήσια κατανάλωση καυσίμου όσο και το αναμενόμενο μελλοντικό κόστος καυσίμου. [27]

Οι Jiang et al. (2014) εφαρμόζουν μια προσέγγιση κατά την οποία υποθέτουν ότι η ηλικία του πλοίου μπορεί να επηρεάσει την επιλογή του φορέα εκμετάλλευσης του πλοίου. [28]

Οι Solakivi et al. (2019) εφάρμοσε μια λογιστική ανάλυση με βάση τις επιλογές των φορέων διαχείρισης πλοίων στη Βαλτική Θάλασσα και αποκάλυψε ότι στα νεότερα κατασκευασμένα σκάφη ήταν πιο πιθανό να εγκατασταθούν πλυντρίδες, επειδή έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής κατά την οποία υπερβαίνεται η περίοδος αποπληρωμής, από δύο έως πέντε χρόνια, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. [29]

Επιπλέον, άλλοι παράγοντες μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη συμπεριφορά των χειριστών πλοίων, όπως τα πρότυπα ιστιοπλοΐας, η κρατική υποστήριξη και η αστάθεια των τιμών των καυσίμων.

Οι Gu και Wallace (2017) εξετάζουν τα μοτίβα ιστιοπλοΐας των πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των επιλογών ταχύτητας και διαδρομής, για να βελτιώσουν τις εκτιμήσεις τους την αξία των διαφορετικών επιλογών συμμόρφωσης. Η εργασία τους αποδεικνύει ότι η αξία ενός scrubber μπορεί να υπερεκτιμηθεί εάν δεν ληφθεί υπόψη το σχέδιο πλεύσης ενός σκάφους κατά τη σύγκριση τεχνολογιών συμμόρφωσης. [30]

Οι έρευνες των Kim και Seo (2019) εξέτασαν την κορεατική ναυτιλία οι πραγματικές επιλογές των εταιρειών να συμμορφωθούν με τους κανονισμούς SOx και υποστήριξαν ότι η κρατική υποστήριξη τόσο από πλευράς πολιτικής όσο και χρηματοδότησης μπορεί να επηρεάσει τις προσδοκίες τους και, κατά συνέπεια, τις επιλογές τους. [31]

Όσον αφορά την αστάθεια των τιμών των καυσίμων, ο Acciario (2014) το ενσωματώνει σε ένα μοντέλο για να συμπεράνει ότι η αλλαγή της διαφοράς τιμής καυσίμου μεταξύ LNG και αποσταγμάτων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο μπορεί πράγματι να επηρεάσει τις επιλογές συμμόρφωσης των φορέων εκμετάλλευσης πλοίων. [32]

4.1.4 Επακόλουθα αποτελέσματα

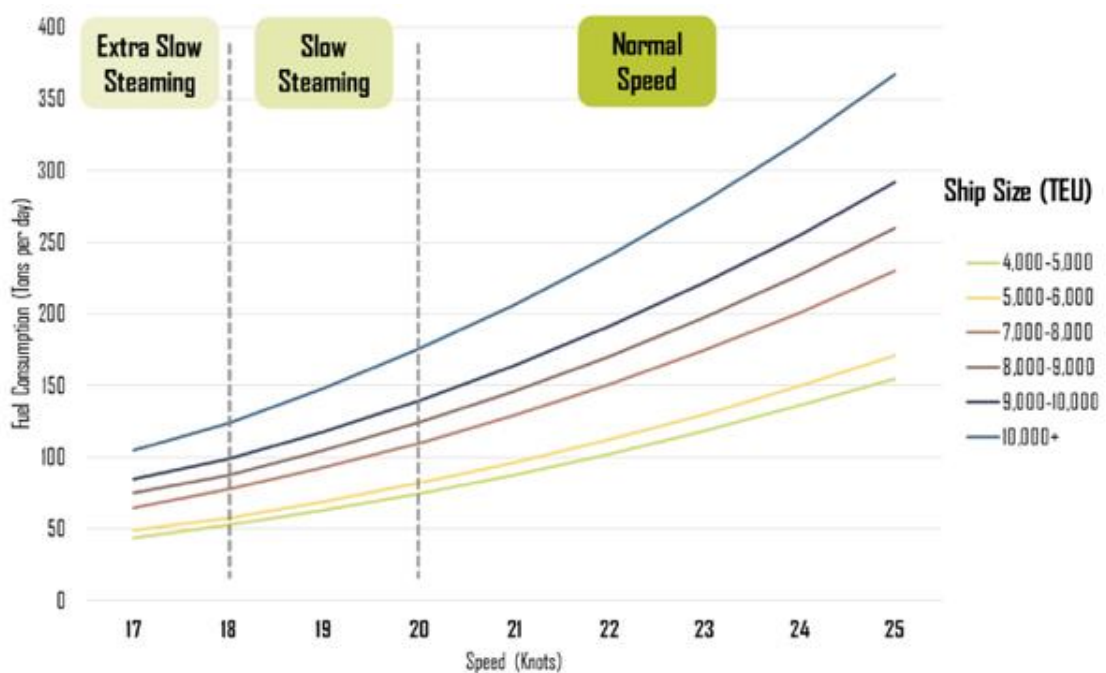
4.1.4.1 *Slow steaming*

Γεγονός αποτελεί ότι η παγκόσμια ναυτιλία επλήγη σκληρά από την άνοδο της τιμής του πετρελαίου κατά την περίοδο 2002-2008, η οποία έπληξε τα περιθώρια κέρδους της, παρά την ισχυρή ζήτηση. Η Maersk, η μεγαλύτερη εταιρεία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στον κόσμο, οδήγησε τη βιομηχανία στη συστηματοποίηση του λεγόμενου «slow steaming», δηλαδή την πρακτική της σκοπίμης μείωσης της ταχύτητας ενός πλοίου για τη μείωση του κόστους καυσίμων. Ενώ οι τιμές του πετρελαίου υποχώρησαν αργά μετά το 2008, και ύστερα πάλι από τα μέσα του 2014, οι αγορές των εμπορευματικών μεταφορών απέτυχαν να ανακάμψουν, καθώς πιέστηκαν από την σημαντική

πλεονάζουσα ικανότητα του στόλου στον απόηχο των νέων ναυπηγήσεων και της επιβράδυνσης της ανάπτυξης του εμπορίου. Ενώ τα οφέλη κόστους από το slow steaming είναι ανάλογα με τις τιμές του πετρελαίου και μπορεί να φαίνονται λιγότερο ελκυστικά σε ένα περιβάλλον χαμηλότερης τιμής πετρελαίου, η πρακτική αυτή, προσφέρει το επιπλέον πλεονέκτημα της εξουδετέρωσης της πλεονάζουσας χωρητικότητας, όταν υπάρχει υπερπροσφορά στις αγορές ναυτιλίας. Αυτό βοήθησε να διαιωνιστεί μέσα από τις πρόσφατες διακυμάνσεις των ναύλων και των τιμών του πετρελαίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν ενδείκνυται όλοι οι τομείς ή οι διαδρομές εξίσου στην πρακτική του slow steaming. Οι μεταφορείς εμπορευματοκιβωτίων, που αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τρίτο του παγκόσμιου στόλου, ταιριάζουν καλύτερα στην πρακτική, καθώς έχουν τις μεγαλύτερη διακυμάνσεις ταχύτητας. Ωστόσο, τα φορτηγά πλοία και τα πετρελαιοφόρα μπορούν, επίσης, να επωφεληθούν και έχουν υιοθετήσει την πρακτική. [33]

Πηγές του κλάδου αναφέρουν ότι οι πρόσφατες συνθήκες της αγοράς σε ορισμένες εμπορικές διαδρομές ευνόησαν ιδιαίτερα την πλεύση με μικρότερες ταχύτητες για την εξάλειψη της πλεονάζουσας χωρητικότητας. Η Maersk έχει υποστηρίξει ότι το slow steaming όχι μόνο εξοικονομεί ενέργεια, αλλά μειώνει επίσης τις εκπομπές άνθρακα και αυξάνει την αξιοπιστία των θαλάσσιων μεταφορών μειώνοντας τα σημεία συμφόρησης στα τερματικά. [34][35][36]

Εικόνα 11: Κατανάλωση καυσίμου ανάλογα την ταχύτητα πλεύσης (κόμβοι) και το μέγεθος του πλοίου (TEU). [52]



Μια μελέτη του 2013 που προσπάθησε να εκτιμήσει το κόστος και τα οφέλη του slow steaming υπό διάφορες συνθήκες όγκου και τιμής καυσίμου, διαπίστωσε ότι η πρακτική απέδωσε κάτω από τις επικρατούσες τότε συνθήκες αλλά ότι «extra slow steaming» ήταν το πιο ωφέλιμο, μειώνοντας το συνολικό κόστος κατά 20% και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 43%, και παρέμεινε βέλτιστο σε ένα ευρύ φάσμα τιμών καυσίμων. [37]

Παρά την ευρεία υιοθέτηση και τα δείγματα θεσμοθέτησης τα τελευταία χρόνια, η εμπειρία δείχνει ότι η πρακτική του slow steaming είναι, πιθανώς, ο πιο παροδικός των παραγόντων που οδηγούν σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και μπορεί να υπόκειται σε αντιστροφή, ανάλογα με τις συνθήκες της αγοράς. [33]

4.1.4.2 Ενοποίηση και βελτιστοποίηση του στόλου

Άλλοι παράγοντες που περιορίζουν τη ζήτηση πετρελαίου για θαλάσσιες μεταφορές αντικατοπτρίζουν πιο μόνιμες αλλαγές. Η ενοποίηση στη ναυτιλία, ιδίως μεταξύ των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, έχει αποκτήσει δυναμική από τότε που ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1990, ξεκλειδώνοντας τεράστιες αποδόσεις στην κατανάλωση καυσίμου. Χρόνια σημαντικής αναδιάρθρωσης έχουν επιτύχει σημαντικές οικονομίες κλίμακας. Σύμφωνα με κατάταξη της Alphaliner, μια υπηρεσία εμπορικών ειδήσεων, οι πέντε κορυφαίοι μεταφορείς αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 60% της συνδυασμένης χωρητικότητας των 100 κορυφαίων μεταφορέων, όπως μετράται σε ισοδύναμες μονάδες 20 ποδιών TEU (Ως TEU ορίζεται ως η κατά προσέγγιση μονάδα μέτρησης ενός εμπορευματοκιβωτίου. Αυτή η μονάδα μέτρησης βασίζεται στις διαστάσεις ενός τυπικού εμπορευματοκιβωτίου – ύψος 8,5 πόδια (2,591 m), πλάτος 8 πόδια (2,438 m) και μήκος 20 πόδια (6,096 m) που αντιπροσωπεύει κατά προσέγγιση όγκο 38,5 κυβικών μέτρων). Ο κλάδος έχει περάσει από τρία διαδοχικά στάδια ενοποίησης. Τα δύο πρώτα στάδια, το 1996–2000 και το 2005–2008, αύξησαν το μερίδιο αγοράς των πέντε κορυφαίων εταιρειών από περίπου 27,43%. Το τελευταίο στάδιο, που ξεκίνησε το 2015, διήρκεσε μέχρι το 2018, ανεβάζοντας περαιτέρω το μερίδιό τους στο προβλεπόμενο 57% (66% για τις συναλλαγές μεγάλων αποστάσεων). [33]

Η ενοποίηση έφερε μαζί της βελτιώσεις στη διαχείριση του στόλου και σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων. Η Maersk θεωρεί τον "εξορθολογισμό του δικτύου", ένα από τα κύρια εργαλεία στην «εργαλειοθήκη», για το ξεκλείδωμα σημαντικών μειώσεων του κόστους. Το επίπεδο της ενοποίησης επέτρεψε σε μεγάλες εταιρείες να επεκτείνουν τη γεωγραφική κάλυψη και το φάσμα υπηρεσιών και να αξιοποιήσουν τα περιουσιακά τους στοιχεία πιο αποτελεσματικά. Ορισμένες μορφές ενοποίησης λαμβάνουν χώρα ακόμη και σε επίπεδο δεξαμενής. Στις αρχές του 2017, το τέσσερις κορυφαίες συμμαχίες μεταφορέων μειώθηκαν σε τρεις. Η 2M Alliance, η Ocean Alliance και η THE Alliance αντιπροσωπεύουν τώρα ένα συνδυασμό του 77% της παγκόσμιας χωρητικότητας και το 96% του

εμπορίου εμπορευματοκιβωτίων. Οι «βελτιώσεις δικτύου» και η «βελτιστοποίηση» επέτρεψαν στη Maersk να βελτιώσει την απόδοση καυσίμου κατά 1,8% σε ετήσια βάση το πρώτο τρίμηνο του 2017, ανέφερε η εταιρεία, μετά από βελτίωση 2,2% το 2016. [33]

4.1.4.3 Βελτιστοποίηση δρομολογίων

Οι αλλαγές στις θαλάσσιες οδούς εξοικονομούν επίσης καύσιμα στις ναυτιλιακές εταιρείες. Από την επέκτασή του, που ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2016, η Διώρυγα του Παναμά μπορεί να φιλοξενήσει όχι μόνο περισσότερα πλοία, αλλά και μεγαλύτερα. Κατά την ολοκλήρωση του έργου, διπλασιάστηκε η χωρητικότητα του καναλιού διευρύνοντας και εμβαθύνοντας τις λωρίδες και προσθέτοντας μια νέα λωρίδα. Ενώ τα μεγαλύτερα πλοία που μπορούσαν προηγουμένως να διαβούν το πέρασμα ήταν τύπου Panamax 5.000 TEU, το διευρυμένο κανάλι μπορεί τώρα να φιλοξενήσει τα λεγόμενα neoPanamax, ή νέα πλοία Panamax, χωρητικότητας 14.000 TEU. [33]

Καθώς η υπερθέρμανση του πλανήτη οδηγεί στην τήξη των πάγων της Αρκτικής, νέες ναυτιλιακές διαδρομές, τελικά, θα ανοίξουν πάνω από τον Βόρειο Πόλο και άλλες προηγουμένως αδιάβατες περιοχές, γεγονός που θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τους χρόνους ταξιδιού για τη ναυτιλία μεγάλων αποστάσεων. [39]

Η επικρατούσα άποψη, ωστόσο, είναι ότι αυτό παραμένει μια σχετικά μακρινή προοπτική και είναι απίθανο να συμβεί σε μεγάλη κλίμακα μέχρι τα μέσα του αιώνα, όχι μόνο λόγω των σκληρών συνθηκών αλλά και επειδή η έλλειψη υποστηρικτικών υποδομών καθιερώνει συχνά ως συχνά προτιμώμενες διαδρομές τις μέχρι τώρα επικρατέστερες. [40]

4.1.4.4 Ψηφιοποίηση

Κοιτάζοντας προς το μέλλον, η ψηφιοποίηση είναι έτοιμη να επαναπροσδιορίσει τις θαλάσσιες μεταφορές όπως ακριβώς μεταμορφώνει την προσωπική κινητικότητα. Η ψηφιοποίηση υπόσχεται να οδηγήσει τη βελτιστοποίηση του στόλου σε ένα νέο επίπεδο και να προωθήσει την εξοικονόμηση καυσίμων. Αφού συλλεχθούν από ροόμετρα, συστήματα ελέγχου και συναγερμού και αισθητήρες, τα δεδομένα λειτουργίας του στόλου, τροφοδοτούν μηχανές ανάλυσης που επιτρέπουν στην εταιρεία να επιτύχει νέες αποδόσεις καυσίμου, συντομότερες περιόδους παραμονής στους τερματικούς σταθμούς και να βελτιώσει το σχεδιασμό του δικτύου. Τα προηγμένα αναλυτικά στοιχεία ανοίγουν ένα εντελώς νέο πεδίο ευκαιριών, ισχυρίζεται η Maersk, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης του δικτύου σε πραγματικό χρόνο για εξοικονόμηση καυσίμων, προγνωστικές επισκευές και βελτιστοποίηση φορτίου. [33]

Η ψηφιοποίηση εξοικονομεί καύσιμα με τουλάχιστον δύο τρόπους: βελτιστοποιώντας τον κινητήρα απόδοσης (κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά, μέσω προγνωστικών επισκευών) και βελτιστοποιώντας

τη διαχείριση του στόλου. Σε συνδυασμό με την ενοποίηση της βιομηχανίας και τη συγκέντρωση στόλων σε διαρκώς διευρυμένες παγκόσμιες συμμαχίες, η ψηφιοποίηση θέτει τις βάσεις για την διαδικασία αλλαγής της αγοράς με την εισαγωγή ενός διαφορετικού τρόπου χρήσης των θαλάσσιων μεταφορών. Σε αυτό το σύστημα, πολλαπλοί φορείς εκμετάλλευσης συγκεντρώνουν και διαχειρίζονται τις ικανότητες του στόλου τους με τον πιο οικονομικό και οικονομικό τρόπο. [33]

4.1.4.5 Εναλλακτικά καύσιμα

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο, LNG, έχει αρχίσει να αμφισβητεί το μονοπώλιο του πετρελαίου στις θαλάσσιες μεταφορές. Αυτό επιτυγχάνεται, από την πλευρά της προσφοράς, καθώς υπάρχει μια νέα αφθονία φυσικού αερίου, καθώς το επιτρέπει η πρόοδος στην τεχνολογία η ικανότητα υγροποίησης ενώ, στο μέτωπο της ζήτησης, σε (συχνά τοπικές) περιβαλλοντικές πολιτικές που στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Τα κινούμενα με ηλεκτρική ενέργεια πλοία και τα υβριδικά πλοία εξακολουθούν να αποτελούν κομμάτι του μέλλοντος, αλλά οι προοπτικές τους διαφαίνονται. Η θέσπιση σχετικά αυστηρών προτύπων εκπομπών θείου, από την 1η Ιανουαρίου 2015, οδήγησε στη μετάβαση σε ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλότερης περιεκτικότητας σε θείο σε μέρη της Ευρώπης, της Βόρειας Αμερικής και της Ασίας, καθώς και στις πρώτες επιδρομές στις αποθήκες LNG. Οι υποδομές διανομής που απαιτούνται για τη χρήση LNG ως ναυτιλιακού καυσίμου παραμένουν σε πρώιμο στάδιο, η διείσδυση του LNG μέχρι πρόσφατα περιορίστηκε σε διακριτά τμήματα του στόλου, σε ECAs, όπως σε σκανδιναβικές ακτοπλοϊκές γραμμές μικρών αποστάσεων ή φορτηγίδες σε κινεζικές πλωτές οδούς. Από το 2018, υπολογίζεται ότι υπήρχαν 122 πλοία που τροφοδοτούνταν με LNG, σε σύγκριση με έναν συνολικό ωκεάνιο στόλο που υπολογιζόταν σε 45.000 πλοία. Τα περισσότερα πλοία που λειτουργούν με LNG, αναμένεται να παραμείνουν αφιερωμένα σε συγκεκριμένες διαδρομές. [33]

Εικόνα 12: : Πλοίο κινούμενο με υγροποιημένο φυσικό αέριο LNG. [53]



4.2 Επιπτώσεις του IMO 2020 στην οικονομία

4.2.1 Σύγκριση πολιτικών συμμόρφωσης

Οι κυριότερες εφικτές πολιτικές συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του IMO 2020, περιλαμβάνουν τόσο τη χρήση του VLSFO, όσο και την εγκατάσταση πλυντρίδων SOx (scrubbers), όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Εν συντομία η περιγραφή των κυριότερων πολιτικών συμμόρφωσης. [41]

| Πολιτική | Περιγραφή |
|-----------|--|
| VLSFO | Το HSFO αντικαθίσταται από το VLSFO ($S \leq 0,5$ % κ.β.) |
| Πλυντρίδα | Εγκατάσταση πλυντρίδας και χρήση HSFO ($S \leq 3,5$ % κ.β.) |

Η υιοθέτηση της στρατηγικής VLSFO δεν αφορά την επανατοποθέτηση του εξοπλισμού του πλοίου, επομένως απαιτεί χαμηλότερη αρχική επένδυση. Ωστόσο, προκύπτει η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο στο μαζούτ σε ανεπαρκή λίπανση των παλινδρομικών μερών του κύριου κινητήρα. Επιπλέον, η αύξηση του λειτουργικού κόστους που προκαλείται από την αβέβαιη διεθνή τιμή του VLSFO αποτελεί σημαντική απειλή. Όσον αφορά την πολιτική εγκατάστασης scrubber, πρέπει να υπάρχει μια αρχική επένδυση που θα αφορά την αλλαγή εξοπλισμού και στην εγκατάσταση πλυντρίδων καυσαερίου, επομένως το αρχικό κόστος κεφαλαίου είναι υψηλότερο. [41]

4.2.2 Επιπτώσεις από την εγκατάσταση πλυντρίδων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι πλυντρίδων (scrubbers): οι ξηρού τύπου που δεν απαιτούν τη χρήση νερού για την επεξεργασία των καυσαερίων, αλλά σπάνια χρησιμοποιούνται στην ναυτιλία και τις υγρού τύπου που ταξινομούνται περαιτέρω σε ανοιχτού βρόχου, κλειστού βρόχου και υβριδικού βρόχου. Οι πλυντρίδες ανοιχτού βρόχου χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό που πρέπει να είναι αλκαλικό για να επιτευχθεί η απομάκρυνση των οξειδίων του θείου. Αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχουν περιορισμοί από τις γεωγραφικές περιοχές, όπου δραστηριοποιείται το πλοίο. Οι πλυντρίδες κλειστού βρόχου δεν έχουν τέτοιους περιορισμούς, καθώς χρησιμοποιούν νερό που επεξεργάζεται με υδροξείδιο του νατρίου. Αυτό πρέπει να αποθηκευτεί σε δεξαμενές και στη συνέχεια να εκκενωθεί μέσα σε κατάλληλες εγκαταστάσεις υποδοχής στην ξηρά. Το κόστος επένδυσης κεφαλαίου ποικίλλει ανάλογα με την τεχνολογία, τον τύπο του πλοίου και το μέγεθος του κινητήρα του. [42]

Οι Den Boer και Hoen (2015) ανέφεραν κόστος εγκατάστασης 200–400 € ανά kW εγκατεστημένης ισχύος (που ισοδυναμεί με 235–470 \$ ανά kW). Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει, το κόστος θα γίνει χαμηλότερο και για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, αναμένονται οικονομίες κλίμακας. [43]

Η DNV GI (2018) ανέφερε ότι το πρόσθετο κόστος για την εγκατάσταση ενός scrubber για ένα νέο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 19.000 TEU θα ήταν περίπου 10 εκατ. USD. Η μετασκευή σε ένα υπάρχον πλοίο θα ήταν πιο δαπανηρή. Η λειτουργία της πλυντρίδας απαιτεί ενέργεια και αυτό αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. [44]

Hansen (2012) διεξήγαγε μια τεχνική ανάλυση ενός από τα πρώτα (και τότε, μεγαλύτερα) συστήματα πλυντρίδας υβριδικού βρόχου που εγκαταστάθηκαν σε πλοίο τύπου Ro-Ro. Ο συγγραφέας εκτίμησε ότι το scrubber με θαλασσινό νερό θα αύξανε την κατανάλωση καυσίμου κατά 1,4%, ενώ όταν χρησιμοποιείται γλυκό νερό ένα επιπλέον 2% θα πρέπει να αποδίδεται στην ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή υδροξειδίου του νατρίου. [45]

Επιπλέον, η εγκατάσταση καταλαμβάνει μόνιμα χώρο στο πλοίο που θα μπορούσε να αφιερωθεί στη μεταφορά εμπορευμάτων, με αποτέλεσμα απώλεια λειτουργικής ικανότητας. Επιπλέον, σε ορισμένα λιμάνια έχει απαγορευτεί η χρήση τα scrubbers ανοιχτού βρόχου. Όλοι αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν τις αδυναμίες και τις απειλές τις πολιτικής που αφορά την εγκατάσταση scrubbers. Ωστόσο, το πλοίο μπορεί να συνεχίσει να χρησιμοποιεί HSFO χαμηλότερης τιμής από το VLSFO αφού είναι εξοπλισμένο με το πλυντρίδα. Αυτό είναι το κύριο πλεονέκτημα αυτής της επιλογής [41]

4.2.3 Επιπτώσεις από τις τιμές καυσίμων

Οι κύριες ανησυχίες μετά την 1η Ιανουαρίου 2015 αφορούσαν τους αυξημένους ναύλους που αναμενόταν να προκύψουν και ως εκ τούτου, τις πιθανές μετατοπίσεις σε μη επηρεαζόμενες υπηρεσίες, ιδίως όσον αφορά τις επιπτώσεις στις υπηρεσίες θαλάσσιων μεταφορών μικρών αποστάσεων (Short Sea Shipping, SSS). Είτε μέσω της λειτουργίας της αγοράς ναύλων είτε μέσω της επιβολής ρητών προμηθειών στους ναύλους με τη μορφή ενός συντελεστή προσαρμογής καυσίμων, υπήρχε φόβος ότι οι ναύλοι θα αυξάνονταν ως άμεσο αποτέλεσμα των πιο αυστηρών κανονισμών για το θείο και της ανάγκης να λαμβάνουν υπόψη τη διαφορά τιμής μεταξύ κανονικών καυσίμων και καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. [42]

Όπως αποδείχτηκε, λόγω των απροσδόκητα χαμηλών τιμών των καυσίμων κατά την περίοδο 2015–2017, οι αναμενόμενες μετατοπίσεις στις υπηρεσίες θαλάσσιων μεταφορών μικρών αποστάσεων στη Βόρεια Ευρώπη δεν πραγματοποιήθηκαν. [46]

Εν αναμονή του παγκόσμιου ανώτατου ορίου θείου που θα επηρέαζε όλες τις ναυτιλιακές δραστηριότητες, οι ίδιοι φόβοι επανεμφανίστηκαν. Τους τελευταίους μήνες του 2019, αρκετοί πλοιοκτήτες άρχισαν να επενδύουν σε συστήματα πλυντρίδων, σε βαθμό που υπήρχε σημαντική συσσώρευση παραγγελιών φτάνοντας τους 5 μήνες από την παραγγελία, μέχρι την εκ των υστέρων τοποθέτηση. Τον Φεβρουάριο του 2019 υπήρχαν 1754 πλοία παγκοσμίως εξοπλισμένο με πλυντρίδες, αριθμός που υπερδιπλασιάστηκε μέσα σε 2 χρόνια. Οι τιμές των καυσίμων ποικίλλουν από λιμάνι σε λιμάνι, όπως και η διαφορά τιμής μεταξύ συμβατικών καυσίμων και μιγμάτων εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας θείου. [42]

Η Εικόνα 2 δείχνει τις τιμές των καυσίμων για τέσσερις καυσίμων τύπους ναυτιλιακών καυσίμων από το 2010 έως το 2020 για το λιμάνι του Ρότερνταμ. Την περίοδο μεταξύ 2010 και 2015, φαίνονται οι τιμές των HFO (με 3,5% κατά βάρος περιεκτικότητα σε θείο) και MGO (0,1% κατά βάρος θείο). Από τα μέσα του 2015 ήταν διαθέσιμος στο εμπόριο ένας άλλος τύπος καυσίμου (υπερ-χαμηλής περιεκτικότητας θείου HFO—ULSFO) που επέτρεπε τη συμμόρφωση με το όριο του 0,1%. [42]



Εικόνα 13: Χρονική μεταβολή τιμών διαφορετικών τύπων ναυτιλιακών καυσίμων. [42]

Τα δεδομένα τιμών για το πετρέλαιο μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (VLSFO—0,5%) είναι διαθέσιμα μόνο από τον Ιανουάριο του 2020. Ωστόσο, καθώς είναι δυνατή η ανάμειξη κανονικού HFO και ULSFO, οι Thalys et al. Το 2021 προσομοίωσαν ποια θα ήταν η τιμή του VLSFO μέσω της ανάμειξης, για μερικά χρόνια πριν από 2020. Κατά τη διάρκεια του 2020, η προσομοιωμένη τιμή ακολουθεί γενικά την πραγματική τιμή VLSFO, αν και η πραγματική τιμή είναι ελαφρώς φθηνότερη τους επόμενους μήνες του 2020.

Οι τιμές των καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο ακολουθούν γενικά τις τάσεις του HFO και για το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου που εξετάστηκε, η διαφορά τιμής ήταν σχετικά σταθερή. Στο Ρότερνταμ, η μέση διαφορά τιμής ήταν 38 \$.

Σε ορισμένα λιμάνια, η τιμή μεταξύ τύπων ναυτιλιακών καυσίμων με περιεκτικότητα θείου 0,5% και 0,1% κατά βάρος κυμαινόταν σε σχεδόν ίδια επίπεδα, ενώ αλλού η διαφορά κυμαινόταν από 30 \$ έως και 150 \$ ανά τόνο, αντίστοιχα.

Το ξέσπασμα της πανδημίας του Covid-19 οδήγησε σε απότομη μείωση της ζήτησης για πετρέλαιο και ιστορικά χαμηλές τιμές καυσίμων. Από την σκοπιά του χειριστή πλοίων, οι πολύ χαμηλές τιμές καυσίμων μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένες ταχύτητες πλεύσης για ορισμένους τομείς της ναυτιλίας, ιδιαίτερα τη μεταφορική, ενώ τα δεξαμενόπλοια προϊόντων και αργού μπορεί να περιμένουν τα πράγματα μέχρι να αυξηθούν ξανά οι τιμές των καυσίμων. Ωστόσο, οι τιμές των καυσίμων άρχισαν να ανακάμπουν τους τελευταίους μήνες του 2020. [42]

Στις θαλάσσιες μεταφορές, οι ναυλωτές είναι υπεύθυνοι για το συνολικό κόστος μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένου του συνολικού κόστους καυσίμων. [47]

Ως εκ τούτου, ο καθιερωμένος τρόπος οικονομικών συναλλαγών στη ναυτιλία είναι ότι ο ναυλωτής, ο οποίος είναι ο πελάτης της υπηρεσίας μεταφοράς, καλύπτει το συνολικό κόστος μεταφοράς, που αποτελείται από έξοδα ταξιδιού και αμοιβή στον πλοιοκτήτη, ο οποίος είναι ο πάροχος ενός πλοίου και ως εκ τούτου, ο πάροχος υπηρεσιών μεταφοράς.

Όταν ο IMO 2020 τέθηκε σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2020, ο μακροχρόνια χρησιμοποιούμενος αυτός καθιερωμένος τρόπος είχε αλλάξει. Συγκεκριμένα, το πρόσθετο κόστος για τη συμμόρφωση με τον νέο κανονισμό του IMO, που απορρέει από τη διαφορά τιμής μεταξύ του μαζούτ υψηλού κόστους-χαμηλής περιεκτικότητας θείου και του μαζούτ χαμηλού κόστους-υψηλής περιεκτικότητας θείου, είχε μεταφερθεί στους πλοιοκτήτες. Με άλλα λόγια, το πρόσθετο κόστος καυσίμων δεν είχε ενσωματωθεί ούτε αντικατοπτρίζεται στο σύνολο των ναύλων που κατέβαλαν οι πελάτες. Ως εκ τούτου, οι ναύλοι δεν είχαν αυξηθεί επαρκώς για την απορρόφηση του πρόσθετου κόστους καυσίμου έτσι ώστε το καθαρό αποτέλεσμα, δηλαδή το μικτό περιθώριο κέρδους για τους πλοιοκτήτες, ήταν μηδέν. [22]

4.2.4 Επιπτώσεις στις οικονομικές αποδόσεις

Το ισοδύναμο ναύλωσης χρόνου (TCE) είναι ένα μέτρο που αφορά την εμπορική ναυτιλία και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας απόδοσης εσόδων ενός πλοίου. Το ισοδύναμο ναύλωσης χρόνου υπολογίζεται λαμβάνοντας τα έσοδα από τα ταξίδια, αφαιρώντας τα

έξοδα του ταξιδιού, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών για αποθήκες, λιμάνια και διελεύσεις από κανάλια, και στη συνέχεια διαιρώντας το σύνολο με τη διάρκεια του ταξιδιού μετ' επιστροφής σε ημέρες. Δίνει στις ναυτιλιακές εταιρείες ένα εργαλείο για τη μέτρηση των αλλαγών από περίοδο σε περίοδο. [48]

Πριν από τον IMO 2020, τα σκάφη μπορούσαν να χρησιμοποιούν το πιο ρυπογόνο και λιγότερο ακριβό μαζούτ υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. Μετά την εισαγωγή του IMO 2020, τα πλοία θα πρέπει να καταναλώνουν λιγότερο ρυπογόνο μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, το οποίο είναι πιο ακριβό σε σύγκριση με το πιο ρυπογόνο μαζούτ με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο.

Σύμφωνα με μελέτη του Sigalas (2022), το TCE πριν και μετά τον IMO 2020 εμφανίστηκε να είναι διαφορετικό, καθώς το κόστος των καυσίμων είναι το υψηλότερο ποσοστό των συνολικών εξόδων ταξιδιού, και επομένως, σημαντικά επηρεάζει τον αριθμητή του TCE. Επιλέχθηκε το τμήμα Capesize επειδή τα πλοία αυτού του τμήματος, τα οποία είναι τα μεγαλύτερα συμβατικά πλοία φορτίου με μεταφορική ικανότητα 180.000 χωρητικότητας νεκρών βαρών, έχουν σημαντικά υψηλότερη κατανάλωση μαζούτ σε σύγκριση με μικρότερα πλοία, όπως τα Handymax, Supramax και Panamax, και συνεπώς ο οικονομικό αντίκτυπος της μετάβασης στο υψηλού κόστους -χαμηλού θείου μαζούτ είναι πιο εμφανές. [22]

Το TCE για τη μεταφορά 170.000 τόνων φορτίου από το Qingdao της Κίνας στο Tubarao, στη Βραζιλία, βρέθηκε ίσο με 9.813 \$ την ημέρα. Αντί της τιμής του καυσίμου υψηλής περιεκτικότητας σε θείο (HSFO) των 308,75 \$ ανά τόνο, όταν χρησιμοποιήθηκε το μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (LSFO) με υψηλότερη τιμή 387,50 \$ ανά τόνο, τότε το TCE αυτής της διαδρομής θα να μειωθεί σε 5.305 \$. Η διαφορά μεταξύ των δύο TCE των 4.509 \$ αποδίδεται στα 78,75 \$ ανά τόνο διαφορά μεταξύ του LSFO και του HSFO [22].

4.2.5 Προβλέψεις για το μέλλον

Οι προβλέψεις είναι εξ ορισμού μια ανακριβής εκτίμηση των μελλοντικών συνθηκών, εξ' άλλου κανείς δεν θα μπορούσε να έχει προέβλεψε την κρίση του Covid-19 και τις καταστροφικές επιπτώσεις στην οικονομία.

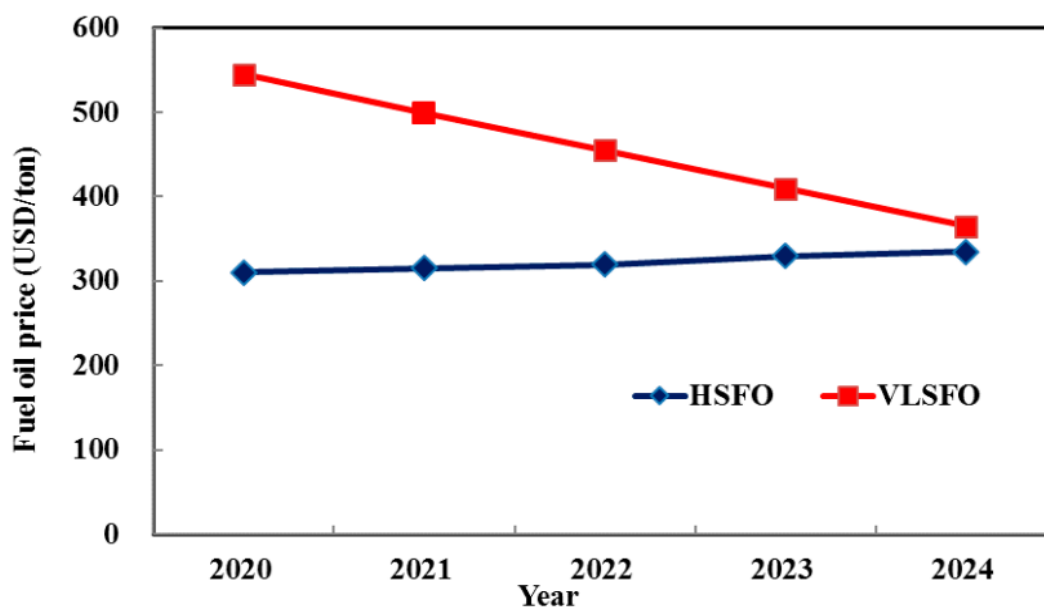
Παρ' όλα αυτά, οι ορθολογικές επιχειρηματικές αποφάσεις δύσκολα μπορούν να βασιστούν σε οτιδήποτε άλλο εκτός από τις τρέχουσες τάσεις και τις προβλεπόμενες μελλοντικές εξελίξεις. Οι τιμές των προϊόντων πετρελαίου συσχετίζονται με την προσφορά και τη ζήτηση αργού πετρελαίου. Οι εκθέσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA), αποτελούν παγκόσμια αναφορά για τις εξελίξεις της αγοράς πετρελαίου. Στην έκθεσή του Ιουλίου 2020, ο IEA παρουσίασε τα στοιχεία των επιπτώσεων της πανδημίας. Το πρώτο εξάμηνο του 2020 η παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου μειώθηκε

κατά 10,75% από 100 εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα (million barrels per day, mb/d) έως 89,25 mb/d. Από την πλευρά της προσφοράς, οι χώρες του Οργανισμού Εξαγωγών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών (ΟΠΕΚ) συμμορφώθηκαν να μειώσουν την παραγωγή σε επίπεδα που εξισορρόπησαν την αγορά και σταθεροποίησαν την τιμή του δείκτη αναφοράς Brent γύρω στα 40 δολάρια το βαρέλι. [49]

Οι αναλυτές προέβλεψαν ότι η ζήτηση βενζίνης θα αυξηθεί. Επειδή η βενζίνη που χρησιμοποιείται για ελαφρά οχήματα (δηλαδή αυτοκίνητα) λογαριάζεται για πάνω από το ήμισυ της ζήτησης ενέργειας στις μεταφορές, η προβλεπόμενη αύξηση της ζήτησης βενζίνης στη μετά-Covid-19 εποχή, θα ανεβάσει τις τιμές για περισσότερα προϊόντα διύλισης πετρελαίου. Η διαφορά τιμής μεταξύ των διαφορετικών τύπων HSFO και VLSFO προβλέφθηκε πως θα αυξηθεί, μετά την κρίση της πανδημίας του Covid-19.

Παρόλα αυτά, μελέτη των Wu και Li συμπέρανε ότι από το 2020 ως το 2024, η τιμή του HSFO θα αυξάνεται αργά χρόνο με το χρόνο, αλλά η τιμή του VLSFO θα πέφτει γρήγορα. Ως εκ τούτου, η διαφορά τιμής μεταξύ των δύο μαζούτ θα μειωθεί σταδιακά. [41]

Εικόνα 14: Διακύμανση της εκτιμώμενης τιμής των μαζούτ την 5ετία 2020-2024. [41]



4.3 Επιπτώσεις του IMO 2020 στο περιβάλλον και τον άνθρωπο

Τα καθαρότερα ναυτιλιακά καύσιμα αποτελούν αναμφισβήτητα ένα θετικό βήμα για την περεταίρω βελτίωση της παγκόσμιας υγείας και την προστασία του περιβάλλοντος, διασφαλίζοντας καθαρότερες ακτές, ατμοσφαιρικό αέρα και μειώνοντας την οικολογική καταστροφή.

Τα ναυτιλιακά καύσιμα, καθώς αποτελούνται συχνά από βαρύ μαζούτ και πετρέλαιο ντίζελ, θεωρούνται ως τα χαμηλότερης ποιότητας καύσιμα, καθώς εκπέμπουν υψηλές ποσότητες λεπτών και εξαιρετικά λεπτών σωματιδίων, οξειδία του θείου (SO_x), οξειδία του αζώτου (NO_x), μέταλλα, αρωματικούς υδρογονάνθρακες και αιθάλη.[54]

Οι σχετικοί κίνδυνοι για την υγεία είναι πολυάριθμοι. Μια μελέτη εκτίμησε ότι η ρύπανση που σχετίζεται με τα πλοία είναι υπεύθυνη παγκοσμίως για περίπου 400.000 πρόωρους θανάτους από καρκίνο του πνεύμονα και καρδιαγγειακές παθήσεις και για 14 εκατομμύρια περιπτώσεις παιδικού άσθματος κάθε χρόνο. Η μείωση της ρύπανσης μέσω του νέου ορίου στις εκπομπές θείου μπορεί να μειώσει την εκτιμώμενη πρόωρη θνησιμότητα και νοσηρότητα που σχετίζονται με τις αντίστοιχες εκπομπές. [55]

Οι πιο άμεσα επηρεαζόμενοι από τη μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου που προέρχονται από τη ναυτιλία είναι οι πληθυσμοί που κατοικούν κοντά σε λιμάνια και ακτές. Τα πιο πολυσύχναστα λιμάνια βρίσκονται στην Ασία. Τα λιμάνια που κατατάσσονται στην κορυφή ανά όγκο εμπορευματοκιβωτίων είναι η Σαγκάη, η Σιγκαπούρη, το Shenzhen, το Ningbo και το Guangzhou. Λίγα από τα κορυφαία λιμάνια στον κόσμο βρίσκονται εκτός Ασίας: το Ρότερνταμ στην Ολλανδία είναι κατατάσσεται στην 11η θέση και το Λος Άντζελες των ΗΠΑ βρίσκεται στην 17η θέση. Επί πλέον, αν και η ρύθμιση των εκπομπών από τη ναυτιλία δεν αποτελεί το επίκεντρο της Συμφωνίας του Παρισιού—πιθανώς λόγω δυσκολιών όσον αφορά την κατανομή των εκπομπών σε συγκεκριμένες χώρες και την αστυνόμευση της συμμόρφωσης — είναι αναμφίβολα κεντρικό στην ατζέντα της κλιματικής αλλαγής για τον μετριασμό των αερίων του θερμοκηπίου. [54]

Σχετικά με τις επιπτώσεις της εφαρμογής του κανονισμού IMO 2020 στο περιβάλλον και τον άνθρωπο, σύμφωνα με μελέτη της Επιτροπής Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE) του IMO, το 2016, η πρόβλεψη για αυτές αφορούσαν τα εξής:

- Οι εκπομπές θείου για το 2020 έως το 2024 θα μειωθούν κατά περίπου 8,5 έως 8,9 εκατομμύρια μετρικούς τόνους ετησίως (2020 και 2025, αντίστοιχα), περίπου 77% χαμηλότερα λόγω της εφαρμογής των προτύπων του Παραρτήματος VI της MARPOL (IMO 2020) σε σύγκριση με τη μη εφαρμογή του.
- Η διαφορά στις εκπομπές οδηγεί σε σημαντικές μειώσεις στις συγκεντρώσεις των θειικών στο περιβάλλον σε παραθαλάσσιες κοινότητες. Οι διαφορές έκθεσης στη ρύπανση είναι ιδιαίτερα έντονες σε υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας κατοικημένες παράκτιες περιοχές σε χώρες της Ασίας, του Ειρηνικού, της Αφρικής και της Λατινικής Αμερικής, αντανακλώντας

μείωση στην έκθεση που παρέχεται από τις ECA της MARPOL του IMO στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική, καθώς και σχετική νομοθεσία, όπως η Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το θείο, όπου τα ευρωπαϊκά κράτη θα διασφαλίζουν ότι «ναυτιλιακά τα καύσιμα πληρούν τα όρια θείου 0,5% κατά βάρος στα χωρικά ύδατα, τις αποκλειστικές οικονομικές ζώνες και τις ζώνες για τον έλεγχο της ρύπανσης» που τέθηκε σε εφαρμογή από την 1η Ιανουαρίου 2020.

- Η καθυστέρηση εφαρμογής από το 2020 έως το 2025 θα συνεισέφερε σε περισσότερους από 570.000 πρόσθετους πρόωρους θανάτους σε σύγκριση με την έγκαιρη εφαρμογή του παραρτήματος VI της MARPOL. Τα οφέλη στην ανθρώπινη υγεία σχετίζονται με την εγγύτητα των παράκτιων κοινοτήτων. [56]

Μελέτη των Cortini και Merico (2021) έδειξαν ότι η εφαρμογή της νέας πολιτικής IMO 2020 θα οδηγήσει σε παγκόσμια μείωση των πρόωρων θανάτων και της νοσηρότητας λόγω της ναυτιλίας κατά 34% περίπου και 54%, αντίστοιχα. Η εφαρμογή της νέας περιοχής ελέγχου εκπομπών θείου (SECA) στη Βόρεια Θάλασσα θα μειώσει τους συνολικούς πρόωρους θανάτους κατά 1% έως το 2030, διπλασιάζοντας το ποσοστό αυτό μετά το 2040. Ωστόσο, οι εκτιμώμενοι πρόωροι θάνατοι που σχετίζονται με τα πλοία θα είναι 250.000 μετά την εφαρμογή της πολιτικής του 2020, ενώ ακόμη και με τις πραγματικές προσπάθειες μείωσης, τα πλοία θα μπορούσαν να ευθύνονται για περίπου 6,4 εκατομμύρια περιπτώσεις παιδικού άσθματος ετησίως στο μέλλον. [57]

Επιπλέον, η μείωση των εκπομπών SO₂ λόγω της εφαρμογής του κανονισμού IMO 2020, προβλέπεται ότι θα προκαλέσουν αύξηση της ακτινοβολίας λόγω αερολύματος. Για τους λόγους αυτούς εκτός από την τρέχουσα θα πρέπει να ληφθούν περαιτέρω αποφάσεις μετριασμού (όπως, για παράδειγμα, η προώθηση της ηλεκτρικής ενέργειας). Η ταυτόχρονη αύξηση του όγκου του θαλάσσιου εμπορίου, του πληθυσμού και της αστικοποίησης στις παράκτιες περιοχές, απαιτούν περαιτέρω προσπάθειες για τον προσδιορισμό πολιτικών και στρατηγικών για τον περιορισμό των επιπτώσεών τους ταυτόχρονα στην ανθρώπινη υγεία και το κλίμα, καθώς είναι δύο όψεις του ίδιου νομίσματος, από τοπική σε παγκόσμια κλίμακα σε ένα ολοκληρωμένο όραμα «πράσινης ναυτιλίας». [57]

4.4 Επιπτώσεις του IMO 2020 στη βιομηχανία κατασκευής πλοίων

Η εξοικονόμηση καυσίμου μέσω οικονομιών κλίμακας και προόδου στην διαχείριση του στόλου αυξήθηκε πρόσφατα από αυξήσεις στα μεγέθη των σκαφών. Όλο και μεγαλύτερα μεταφορικά πλοία επιτρέπουν σημαντικά κέρδη στην απόδοση. Ο αγώνας για το μέγεθος απογειώθηκε σοβαρά το 2013, όταν η Maersk ξεκίνησε την κατηγορία πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων «Triple E» άνω των 18.000 ισοδύναμων μονάδων είκοσι ποδιών (TEU). [33]

Οι Γραμμές Εμπορευματοκιβωτίων της Κίνας (CSCL, τώρα China COSCO) ακολούθησε το παράδειγμα με το CSCL Globe, 19.100 TEU, που κυκλοφόρησε τον Νοέμβριο του 2014, μαζί με τέσσερα παρόμοια πλοία. Στη συνέχεια ήρθε η Mediterranean Shipping Company (MSC) με το Όσκαρ MSC 19.224 TEU, τον Ιανουάριο του 2015, μαζί με τα αδελφά πλοία MSC Zoe και MSC Όλιβερ. Αυτά τα σκάφη δεν σημείωσαν ρεκόρ μόνο για το μέγεθος αλλά και για την απόδοση καυσίμου. Το όνομα «Triple E» αναφέρεται στο τρεις αρχές της οικονομίας κλίμακας, της ενεργειακής απόδοσης και της περιβαλλοντικής αριστείας. Ανακοινώνοντας την κυκλοφορία του Globe, η CSCL επίσης ανέδειξε την υψηλότερη απόδοση καυσίμου, τις χαμηλότερες εκπομπές CO₂ και μείωση του θορύβου. [38]

Οι ναυτιλιακές εταιρείες που αποκαλύπτουν την κατανάλωση καυσίμου τους, επιβεβαιώνουν ότι είναι αρκετή η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Η Harag-Lloyd σημείωσε πτώση στην κατανάλωση καυσίμων κατά 8,4% σε ετήσια βάση, σε 0,43 μετρικούς τόνους (MT) ανά TEU για το πρώτο τρίμηνο του 2017 και πιστώθηκε εν μέρει στα μεγάλο μέγεθος των πλοίων της. Παρά τους υψηλότερους όγκους αποστολών, η συνολική χρήση καυσίμων μειώθηκε κατά 2,2% από έτος σε έτος το πρώτο τρίμηνο, σε 803.000 MT, και κατά 6,3% το 2016. Η εταιρεία απέδωσε την τελευταία πτώση στη «χρήση μεγαλύτερων και πιο αποτελεσματικών πλοίων, καθώς και τη βελτιστοποίηση των αναπτυσσόμενων στόλων και του παγκόσμιου δικτύου υπηρεσιών». Η ουσία είναι ότι οι κορυφαίες ναυτιλιακές εταιρείες χρησιμοποιούν όλο και λιγότερα καύσιμα, παρόλο που συνέχισαν να αυξάνουν το μερίδιο αγοράς τους και τον όγκο αποστολής. Δεδομένης της συνεχιζόμενης ενοποίησης του κλάδου, είναι πιθανές περαιτέρω μειώσεις στη χρήση καυσίμων. [33]

4.5 Επιπτώσεις του IMO 2020 στη βιομηχανία πετρελαίου

Ακολουθώντας τις αυστηρότερες απαιτήσεις, τα διυλιστήρια φέρουν το κύριο βάρος της αυξανόμενης ζήτησης για ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Περίπου 2 εκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου την ημέρα (bbl/d) μαζούτ μετατρέπονται σε καύσιμα απόσταξης για να συμμορφώνονται με το παγκόσμιο ανώτατο όριο θείου. Αυτό απαιτεί σημαντικές αλλαγές στα διυλιστήρια, προεκτιμένου να αυξηθεί η ικανότητα των διεργασιών μετατροπής υπολειμμάτων για την παραγωγή Gasoil, η ανάπτυξη μεγαλύτερων διεργασιών αφαίρεσης θείου. Μια ανάλυση των τροποποιήσεων του διυλιστηρίου για την επίτευξη των στόχων απαιτεί επενδύσεις κεφαλαίου 2–5 δισεκατομμυρίων δολαρίων για διυλιστήριο 350.000 bbl/d, με περιόδους αποπληρωμής 4,2–5 ετών.[83]

Περίπου το 50% του αργού πετρελαίου συνήθως προέρχεται από τα κλάσματα βαρέων καυσίμων. Ωστόσο, με την αύξηση της ζήτησης ελαφρύτερων καυσίμων και τη μείωση των απαιτήσεων βαρέων καυσίμων, συχνά συντονίζονται πολύπλοκες διεργασίες διυλιστηρίων, για την παραγωγή ελαφρύτερων κλασμάτων. Τα ναυτιλιακά καύσιμα αποτελούνται από ντίζελ, κηροζίνη, ελαφρύ και βαρύ πετρέλαιο και κλάσματα ατμοσφαιρικών υπολειμμάτων. Η κηροζίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παροχή για την παραγωγή πετρελαίου και αποστάγματος ναυτιλιακού ντίζελ και αυτά τα προϊόντα χρησιμοποιούνται για τη μείωση του ιξώδους των υπολειμμάτων μέσω της ανάμειξης. Από τον πυθμένα του τμήματος της ατμοσφαιρικής ακατέργαστης απόσταξης, το ατμοσφαιρικό υπόλειμμα προχωρά στην απόσταξη υπό κενό, όπου διαχωρίζεται περαιτέρω σε ένα ελαφρύ κλάσμα που τροφοδοτείται σε μια ρευστή καταλυτική πυρόλυση (FCC) και σε ένα βαρύ κλάσμα που προχωρά σε μια διαδικασία θραύσης ιξώδους. Η διαδικασία FCC περιλαμβάνει υψηλές θερμοκρασίες και έναν καταλύτη πυριτικού αλουμινίου για την παραγωγή περισσότερης βενζίνης, LCO (Light Cycle Oil), το οποίο είναι προϊόν απόσταξης, HCO (Heavy Cycle Oil), το οποίο προστίθεται στο υπόλειμμα. Η ανάμειξη αυτών των διαφορετικών ροών προϊόντων με ρεύματα λιγότερο επιθυμητών ιδιοτήτων (δηλαδή υψηλού ιξώδους και πυκνότητας) για την επίτευξη προτύπων καυσίμων για πλοία, με προδιαγραφές σύμφωνα με τους κανονισμούς, μεγιστοποιεί τη συνολική απόδοση του διυλιστηρίου. [83]

5. Εξελίξεις στην αντιμετώπισή τους

Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι κυριότερες επιλογές στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων του νέου κανονισμού IMO 2020, αφορούν τη χρήση ναυτιλιακών καυσίμων πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, την εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων και τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν περαιτέρω οι εναλλακτικοί τρόποι παραγωγής καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και θα εξεταστούν οι εναλλακτικές μορφές πράσινης ενέργειας που μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα πλοίο. Θα αναφερθούν, δηλαδή, και θα αναλυθούν οι εξελίξεις στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων του IMO 2020.

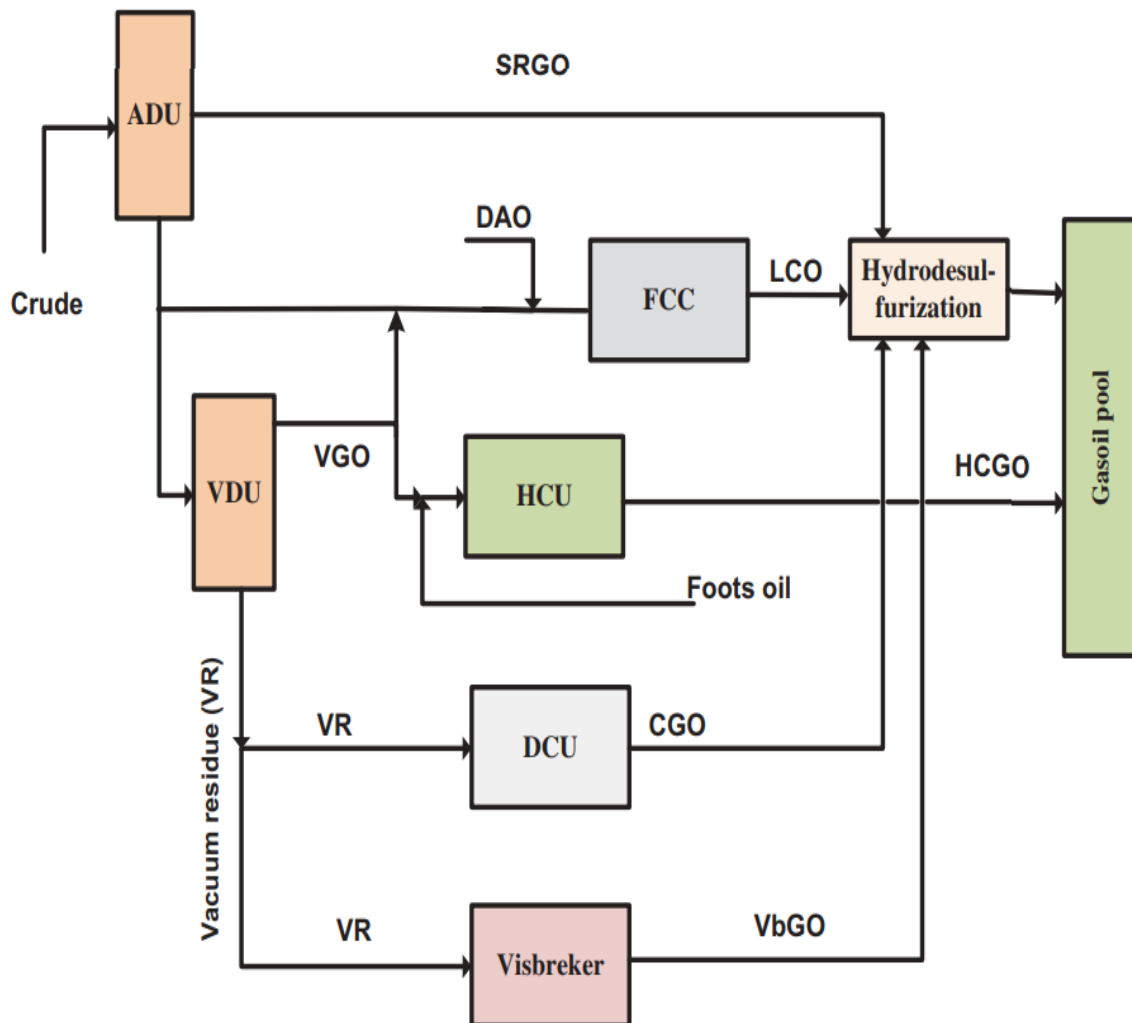
5.1 Ναυτιλιακά Καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο

5.1.1 Υδρογοναποθείωση

Επί του παρόντος, η συμβατική τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα διυλιστήρια πετρελαίου για τη μείωση της περιεκτικότητας σε θείο στα προϊόντα πετρελαίου είναι η υδρογοναποθείωση (Hydrodesulfurization, HDS), κατά την οποία, με την παροχή υδρογόνου το θείο απομακρύνεται ως υδρόθειο. Η διεργασία της υδρογοναποθείωσης βασίζεται στη διέλευση υδρογόνου μέσω των κλασμάτων πετρελαίου σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες, πάνω από καταλυτικές κλίνες. Η βαθειά υδρογοναποθείωση, η οποία αναφέρεται σε συνθήκες διεργασίας που στοχεύουν σε επίπεδα θείου κάτω από 15 ppm στα καύσιμα ντίζελ, είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία με υψηλή λειτουργικότητα και το κόστος κεφαλαίου, το οποίο, επίσης, μειώνει τη θερμογόνο δύναμη του τελικού προϊόντος.

[58]

Εικόνα 15: Σχηματική απεικόνιση των διυλιστηριακών διεργασιών παραγωγής αποθειωμένων κλασμάτων από αργό πετρέλαιο. [63]



Η περιεκτικότητα σε θείο των μη επεξεργασμένων αποσταγμάτων τυπικά μπορεί να φτάσει έως και 10wt.%, με τις κυριότερες ενώσεις που συναντώνται να είναι τα σουλφίδια, τα δισουλφίδια, οι μερκαπτάνες και τα διβενζοθειοφαίνια. Η αποθείωση τέτοιων αποσταγμάτων σε πολύ χαμηλά επίπεδα επίπεδα αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση, ειδικά σε χαμηλές πιέσεις υδρογόνου. Λόγω των σημερινών προδιαγραφών που επιβάλλονται, σήμερα πολλά αποθειωμένα αποστάγματα έχουν χαμηλή συνολική περιεκτικότητα σε θείο, αλλά δυσανάλογα υψηλή συγκέντρωση ενώσεων θείου που παρουσιάζουν «ανθεκτικότητα» στην υδρογονοαποθείωση, όπως είναι το διβενζοθειοφαίνιο (dibenzothiophene, DBT) και οι υποκατεστημένες παραλλαγές του (4-Methyl-DBT, 4,6-Dimethyl-DBT, 4-Methyl-DBT) Η ανθεκτικότητα των DBTs προκύπτει από τη δομή των μορίων τους. [59]

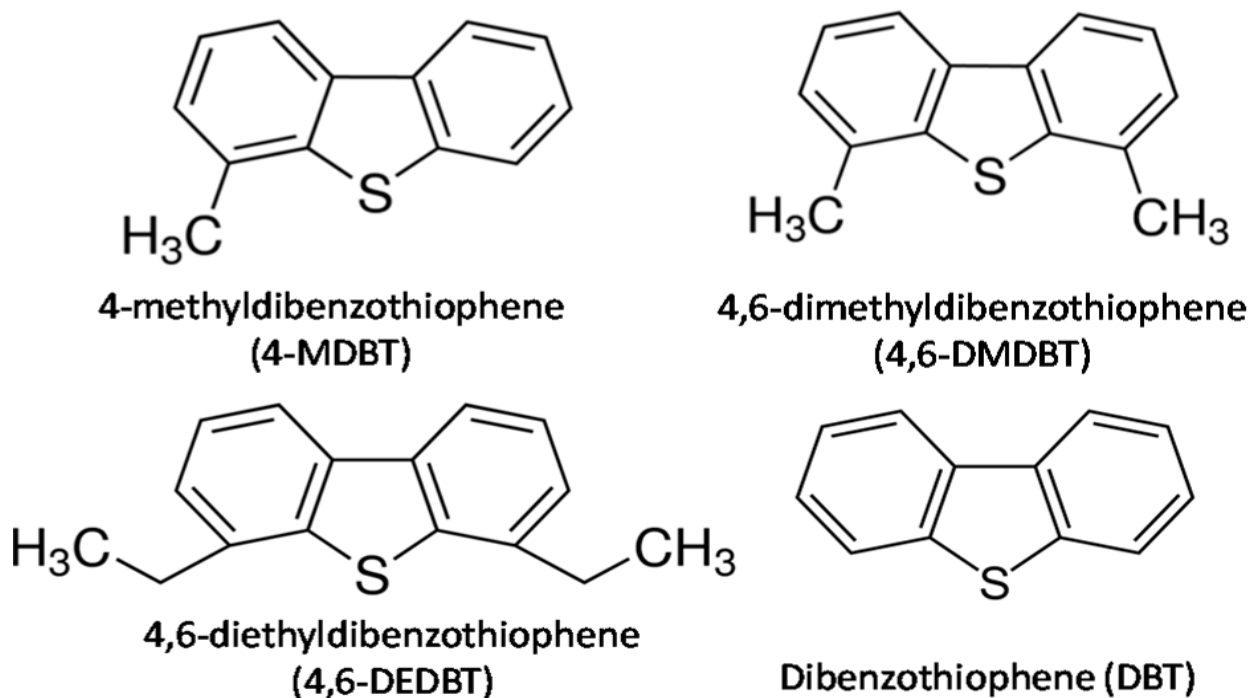
Πίνακας 6: Σύγκριση των θειούχων ενώσεων που συναντώνται στο αργό πετρέλαιο ως προς την ευκολία αποθείωσης. [63]

| Θειούχα Ένωση | Σχετικό ποσοστό HDS | Ευκολία απομάκρυνσης θείου |
|----------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Θειοφαίνιο | 100 | Μεγάλη |
| Βενζοθειοφαίνιο | 50 | Μεγάλη |
| Διβενζοθειοφαίνιο | 30 | Μικρή |
| 4-Μέθυλ-Διβενζοθειοφαίνιο | 5 | Πολύ μικρή |
| 4,6-Διμέθυλ-Διβενζοθειοφαίνιο | 1 | Πολύ μικρή |
| 2,3,6-Τριμέθυλ-Διβενζοθειοφαίνιο | 1 | Πολύ μικρή |

Για τη βαθειά αποθείωση των αποσταγμάτων απαιτούνται διαφορετικοί καταλύτες και συνθήκες. Έχουν πραγματοποιηθεί μεγάλα βήματα για τη διερεύνηση διαφόρων διεργασιών δύο σταδίων. Οι περισσότερες υπάρχουσες διεργασίες υδρογονοαποθείωσης κλασμάτων πετρελαίου έχουν βελτιστοποιηθεί για την επεξεργασία ακατέργαστων αποσταγμάτων, ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές των 350-500 ppm. [59]

Για να επεκταθεί η σημερινή τεχνολογία σε βαθμό ώστε να καλύπτει τις περιπτώσεις του καθεστώτος εξαιρετικά χαμηλού θείου, απαιτείται να ξεπεραστεί η δυσκολία αποθείωσης 4- και 4,6-υποκατεστημένων διβενζοθειοφαινίων.

Εικόνα 16: Η Χημική δομή των διαφορετικών τύπων του DBT.



Η έρευνες σχετικά με τη διεργασία της υδρογοναποθείωσης, τα τελευταία χρόνια, έχουν επικεντρωθεί στη φύση των χρησιμοποιούμενων καταλυτών.

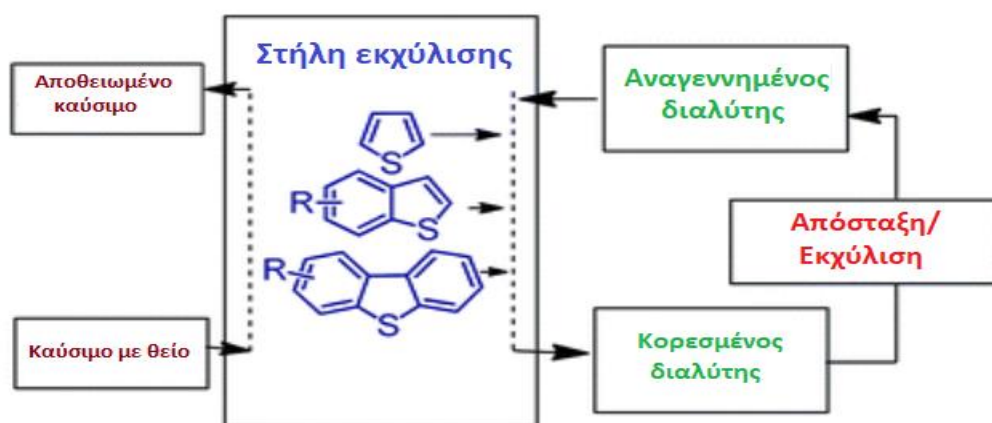
Οι Fujikawa et al. (2006) χρησιμοποίησαν ως καταλύτη το σύμπλοκο C-606A, με το οποίο παρατηρήθηκε εξαιρετικά υψηλή δραστηριότητα υδρογοναποθείωσης, η οποία επιτυγχάνει περιεκτικότητα σε θείο <10 ppm σε προϊόντα πετρελαίου, χρησιμοποιώντας υδροεπεξεργαστές που έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή καυσίμων ντίζελ με περιεκτικότητα σε θείο 500 ppm, χωρίς μεγάλης κλίμακας ανακατασκευές. [60]

Το 2010 μελετήθηκε από τους Klimov et al., η σύνθεση διμεταλλικών ενώσεων Co–Mo από επταμολυβδαινικό αμμώνιο, κιτρικό οξύ και οξικό κοβάλτιο για την παρασκευή καταλυτών για την εξαιρετικά βαθειά υδροναποθείωση των καυσίμων ντίζελ. Ο παρασκευασμένος καταλύτης δοκιμάστηκε σε κλάσματα gas oil, επιδεικνύοντας υψηλή υδροναποθειωτική δραστηριότητα στην παραγωγή καυσίμου ντίζελ εξαιρετικά χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. [61]

5.1.2 Αποθείωση με Εκχύλιση

Η διαδικασία της αποθείωσης με εκχύλιση (Extractive Desulphurization, EDS) περιλαμβάνει την απομάκρυνση του θείου μέσω του «καθαρισμού» του ρεύματος υδρογονάνθρακα με μη αναμίξιμο διαλύτη (π.χ. διμεθυλοσουλφοξείδιο ή φουρφουράλη) και ανάκτηση του διαλύτη για επαναχρησιμοποίηση. Η εφαρμογή της εκχύλισης με διαλύτες για την απο-αρωματοποίηση και την παραγωγή αρωματικών είναι καλά εδραιωμένη στην εμπορική και βιομηχανική κλίμακα λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών της λειτουργίας σε συνθήκες χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας, της εύκολης ανάκτησης του διαλύτη για επαναχρησιμοποίηση και της έλλειψης ανάγκης για καταλύτες, κοστοβόρο υδρογόνο και ειδικό εξοπλισμό όπως αντιδραστήρες υψηλής πίεσης και συμπιεστές. [62]

Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας αποθείωσης με εκχύλιση. [64]



Τα κλάσματα gas oil παράγονται στα διυλιστήρια σε πολύ μεγάλη κλίμακα. Ως εκ τούτου, μελετώντας τη λειτουργική κλίμακα, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την εμπορευματοποίηση διεργασιών για βαθιά αποθείωση, πέρα από της συμβατικές, η αποθείωση με εκχύλιση φαίνεται να αποτελεί μία από τα πιο ελκυστικές επιλογές ως συμπληρωματική διαδικασία της υδρογοναποθείωσης, λόγω της απλής λειτουργίας και της ικανότητας αφαίρεσης «ανθεκτικών» ενώσεων θείου, πολυαρωματικών και αζωτούχων ενώσεων σε μεγάλο βαθμό από τα κλάσματα gas oil. [63]

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στη χρήση ιοντικών υγρών (Ionic Liquids, ILs) στη διεργασία της αποθείωσης με εκχύλιση. Τα ιοντικά υγρά αποτελούνται από οργανικά κατιόντα και ανόργανα/οργανικά ανιόντα, τα οποία παρέχουν ένα μοναδικό μέσο για τις διεργασίες διαχωρισμού και χημικής αντίδρασης. Οι ιδιότητες των ιοντικών υγρών εξαρτώνται από τα ιοντικά χαρακτηριστικά τους και τον συνδυασμό του κατιόντος και ανιόντος. Γνωστά κατιόντα είναι το ιμιδαζόλιο, το πυριδίνιο, το ισοκινόλιο, το αμμώνιο, το φωσφόριο και το σουλφόριο. [64]

Το 2001, οι A. Bosman et al. εφάρμοσε την τεχνική των ιοντικών υγρών στην αποθείωση με εκχύλιση για την αφαίρεση ενώσεων θείου στα καύσιμα για πρώτη φορά. Από τότε, πολλοί ερευνητές έχουν κάνει χρήση των ιοντικών υγρών ως διαλυτών για την απομάκρυνση των θειούχων ενώσεων. Αυτά τα ιοντικά υγρά ήταν ως επί το πλείστον με βάση το ιμιδαζόλιο και το πυριδίνιο με διαφορετικά ανιόντα. [65]

Ο Πίνακας 7 δείχνει τη λίστα των ιοντικών υγρών που χρησιμοποιήθηκαν στην αποθείωση με εκχύλιση ανά διαφορετικούς ερευνητές.

Πίνακας 7: Αποδόσεις διαφορετικών ιοντικών υγρών στην απομάκρυνση θείου από πραγματικά καύσιμα, σε διαφορετικές θερμοκρασίες. [66][67]

| ILs | Oil | Initial S: (ppm) | IL-oil mass ratio | S extraction efficiency for temperatures (%) | | | | | Ref. |
|---|----------|---------------------|----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| | | | | 20 °C | 25 °C | 35 °C | 45 °C | 50 °C | |
| [HMMPY][NTf ₂] | Diesel | 10 000 | 1 : 1 | n/a | 24 | n/a | n/a | 62.2 | Rodríguez et al. (2014) |
| [EMIM][NTf ₂] | Diesel | 10 000 | 1 : 1 | n/a | 11 | n/a | n/a | 50 | Rodríguez et al. (2014) |
| [EMI][OAc] | Diesel | 10 000 | 1 : 1 | n/a | 10.6 | n/a | n/a | 13 | Rodríguez et al. (2014) |
| [EMI][Et ₂ PO ₄] | Diesel | 10 000 | 1 : 1 | n/a | 13.5 | n/a | n/a | 17 | Rodríguez et al. (2014) |
| [BMIM][N(CN) ₂] | Gasoline | 300 | 1 : 1 | 18 | 12.1 | 12 | 11.1 | 11 | Asumana et al. (2013) |
| | Diesel | 400 | 1 : 1 | 31.8 | 28.1 | 27.5 | 27 | 27 | Asumana et al. (2013) |

5.1.3 Οξειδωτική αποθείωση

Η διαδικασία οξειδωτικής αποθείωσης, ως μία μέθοδος παραγωγής καυσίμου ντίζελ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, περιλαμβάνει το σχηματισμό οξειδωμένων ενώσεων θείου (σουλφοξειδία και σουλφόνες), σε αντίθεση με την υδροαποθείωση, όπου οι ενώσεις θείου απομακρύνονται με το σχηματισμό υδρόθειου. Η διαδικασία της οξειδωτικής αποθείωσης (Oxidative Desulphurization ODS) περιλαμβάνει δύο στάδια: την οξείδωση των θειούχων ενώσεων που υπάρχουν στο καύσιμο ντίζελ, όπως π.χ. το διβενζοθειοφαίνιο, σε αντίστοιχα σουλφοξειδία και σουλφόνες, και την εύκολη απομάκρυνση των σχηματισμένων σουλφόνων με εκχύλιση (ή προσρόφηση) λόγω της υψηλής πολικότητάς τους. Στη διαδικασία της οξειδωτικής αποθείωσης, το διβενζοθειοφαίνιο μπορεί εύκολα να οξειδωθεί υπό ήπιες συνθήκες αντίδρασης (χαμηλή θερμοκρασία αντίδρασης και χαμηλή πίεση) και χωρίς τη χρήση υδρογόνου, γεγονός που καθιστά τη διαδικασία οικονομικά εφικτή. Εφόσον αποφεύγεται η χρήση του ακριβού υδρογόνου, η διαδικασία είναι εφαρμόσιμη σε διυλιστήρια μικρού και μεσαίου μεγέθους. Πρόσφατα, πολλά συστήματα οξείδωσης έχουν μελετηθεί, ενώ έχει εξεταστεί το υπεροξειδίο του υδρογόνου ως ένα ισχυρό οξειδωτικό των ενώσεων του θείου. [68]

Το 2015 οι Palaić et al. μελέτησαν την επίδραση μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας οξείδωσης-εκχύλισης και παρατήρησαν μείωση της συγκέντρωσης θείου σε καύσιμο ντίζελ από τη μέγιστη τιμή των 4000mg/kg σε 3mg/kg μετά από 30 λεπτά οξείδωσης. [68]

5.1.4 Αποθείωση με προσρόφηση

Στην αποθείωση με προσρόφηση (Adsorptive Desulphurization, ADS), οι ενώσεις θείου στα κλάσματα πετρελαίου αφαιρούνται μέσω προσρόφησης σε ένα προσροφητικό μέσο, που συνήθως τοποθετείται σε μη αντιδραστικό και πορώδες υπόστρωμα. Η προσροφητική αποθείωση μπορεί να είναι άμεση, ανάλογα με τη φύση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των θειούχων ενώσεων και του προσροφητικού. Η επιλογή του προσροφητικού είναι ένας από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της προσρόφησης. Διερευνήθηκαν διαφορετικοί τύποι προσροφητικών, όπως ο ενεργοποιημένος άνθρακας, η αλουμίνα, ζεόλιθοι και πυριτική γέλη, μεταξύ των οποίων ο ενεργός άνθρακας είναι ο περισσότερο μελετημένος λόγω της αποτελεσματικής επιφάνειας και του καλού πορώδους του. [64]

Μια πρόκληση στην αποθείωση με προσρόφηση είναι η εύρεση των κατάλληλων μέσων προσρόφησης που προσροφούν επιλεκτικά και αποτελεσματικά ενώσεις θείου ενώ δεν προσροφούν υδρογονάνθρακες. Οι αρωματικές ενώσεις θείου είναι παρόμοιες με τις ολεφινικές ως προς

ορισμένες ιδιότητες, όπως η παρουσία περισσότερων από δύο διπλών δεσμών με τους οποίους μπορούν τα άτομα μετάλλων να αλληλεπιδρούν εύκολα. Μια άλλη πρόκληση είναι η αναγέννηση των προσροφητικών ουσιών πλήρως μετά την διαδικασία. [64]

Στον Πίνακα 8 φαίνονται οι αποδόσεις διαφόρων τύπων προσροφητικών μέσων που χρησιμοποιήθηκαν για την αποθείωση κλασμάτων πετρελαίου.

Πίνακας 8: Διαφορετικά προσροφητικά που χρησιμοποιούνται για αποθείωση με προσρόφηση σε βελτιστοποιημένες συνθήκες. [69][70][71]

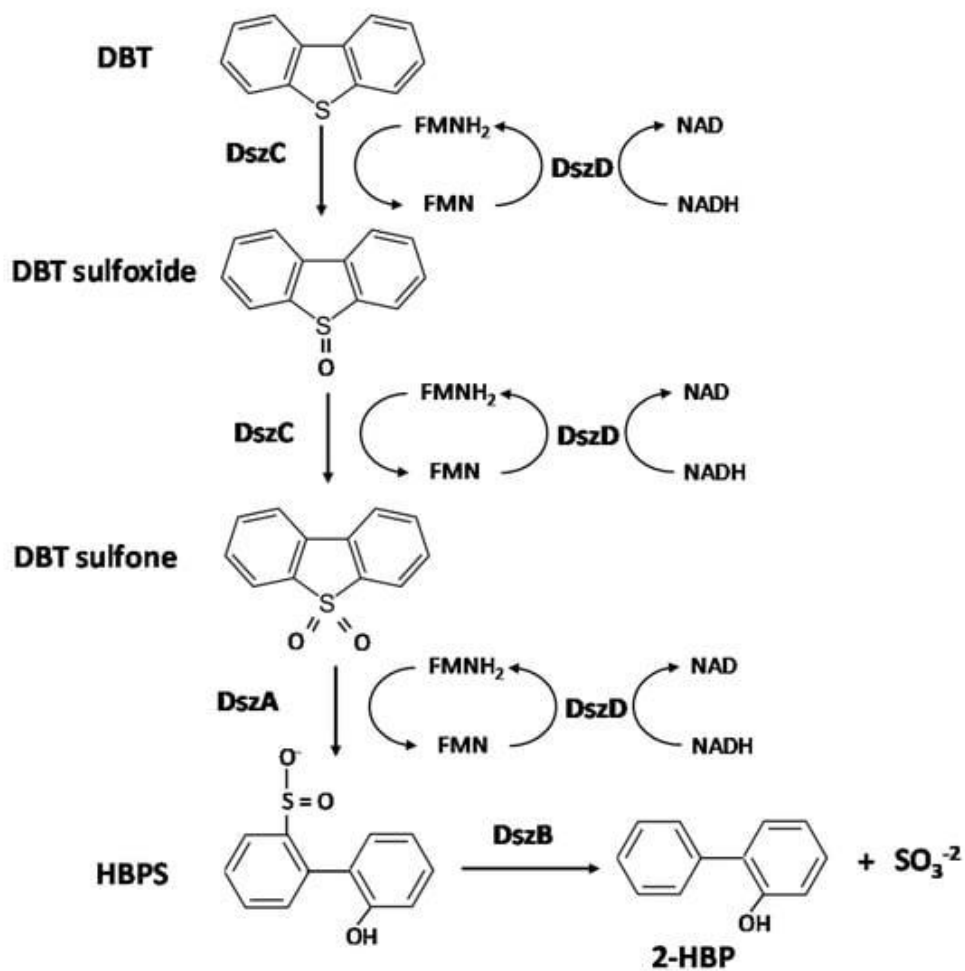
| Adsorbents | Model oil | S comp. | Initial S: (ppm) | Temp. (K) | Pressure (atm) | S removal | Ref. |
|------------------|-----------|---------|------------------|-----------|----------------|-----------|------------------------|
| Activated carbon | Gas oil | DBT | 178 | 198 | 1 | 95% | Ania et al. (2007) |
| | Gas oil | TS | 300 | 243 | 1.5 | 88% | Sano et al. (2005) |
| Alumina | Gas oil | DBT | 700 | 393 | n/a | 30% | Larrubia et al. (2002) |

5.1.5 Βιολογική αποθείωση

Η βιολογική αποθείωση ή βιοαποθείωση (Biodesulphurization, BDS) είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη χρήση συγκεκριμένων μικροοργανισμών ικανών να χρησιμοποιούν το θείο στο θειοφαίνιο και άλλες ετεροκυκλικές ενώσεις θείου ως μοναδική πηγή θείου. Η βιοαποθείωση έχει προταθεί, μαζί με την υδρογοναποθείωση, ως επεξεργασία για τα προϊόντα πετρελαίου για την επίτευξη εξαιρετικά χαμηλών επιπέδων θείου και την αποφυγή των μειονεκτημάτων που παρουσιάζονται κατά τη διαδικασία της βαθιάς υδρογοναποθείωσης. [72]

Αρκετά βακτηριακά γένη, όπως τα *Rhodococcus*, *Ralstonia*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Mycobacterium*, *Sphingomonas*, *Pseudomonas* και *Gordonia*, μπορούν να χρησιμοποιήσουν το θείο από το διβενζοθειοφένιο μέσω του λεγόμενου μονοπατιού 4S, δηλαδή τη συνεργιστική δράση ενζύμων ενδοκυτταρικά, και να το μετατρέψουν στην ένωση χωρίς θείο 2-Hydroxybiphenyl ή 2-HBP. Το μονοπάτι 4S δεν επηρεάζει τον άνθρακα της οργανοθειικής ένωσης, επομένως, διατηρείται η ποιότητα (θερμογόνο δύναμη) του καυσίμου. Το μονοπάτι 4S, το οποίο οδηγεί στη διάσπαση δεσμού C-S, απεικονίζεται τυπικά για το DBT, αλλά ισχύει για πολλές οργανοθειικές ενώσεις. Η κατανάλωση του θείου από μικροοργανισμούς δύναται να συμβεί τόσο κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του μικροοργανισμού (growing cells), όσο και κατά τη διατήρησή τους σε κατάσταση «ανάπαυσης» (resting cells). [72]

Εικόνα 18: Το μονοπάτι 4S



Στον Πίνακα 9 φαίνονται οι αποδόσεις αποθείωσης κλασμάτων πετρελαίου, από διαφορετικούς μικροοργανισμούς σε διαφορετικές συνθήκες.

Πίνακας 9: Συνθήκες και αποδόσεις βιοαποθείωσης κλασμάτων πετρελαίου. [73]

| Bacterium | Growing/resting state | Sulfur substrate | Total sulfur (ppm) | Desulfurization (%) | Temp. (°C) | Reaction time (h) |
|--|----------------------------------|--|--------------------|---------------------|------------|-------------------|
| <i>Desulfobacterium anilini</i> | Growing cells | Diesel | – | 82 | 30 | 72 |
| <i>Rhodococcus erythropolis</i> FSD-2 Strain CYKS1 | Resting cells | HDS-treated diesel | 198 | ~94 | 30 | 12 |
| <i>Sphingomonas subarctica</i> T7b | Growing cells | Middle distillate unit feed | 1500 | 70 | 30 | 12 |
| | | Light gas oil | 3000 | 50 | | |
| <i>Mycobacterium phlei</i> WU-F1 | Growing cells | HDS-treated light gas oil | 280 | 59 | 27 | 36 |
| <i>Mycobacterium phlei</i> WU-0103 | Resting cells | HDS-treated light gas oil (three types with different sulfur contents) | 34–390 | 60–70 | 45 | – |
| <i>Gordonia nitida</i> CYKS1 | Resting cells | Crude straight-run light gas oil (12-fold-diluted) | 1000 | 52.5 | 45 | 72 |
| <i>Rhodococcus</i> sp. P32C1 | Resting cells | Diesel oil | 250 | 76 | 30 | 20 |
| | | HDS-treated light diesel oil | 303 | 48.5 | 30 | 24 |
| <i>Mycobacterium</i> sp. X7B | Resting cells | Diesel oil | 1000 | 23.7 | 45 | 24 |
| <i>Pseudomonas delafieldii</i> R-8 | Resting cells | HDS-treated diesel oil | 535 | 86 | 30 | 20 |
| <i>Pseudomonas delafieldii</i> R-8 | Culture suspension | HDS-treated diesel oil | 591 | 90.5 | 30 | 20 |
| <i>Pseudomonas delafieldii</i> R-8 | Resting cells | HDS-treated diesel oil | 591 | 47 | 30 | 16 |
| <i>Rhodococcus erythropolis</i> XP | Resting cells | Straight-run diesel oil | 1807 | 55.3 | 30 | 24 |
| <i>Nocardia globerula</i> R-9 | Resting cells | HDS-treated diesel oil | 259 | 94.5 | 30 | 24 |
| <i>Rhodococcus</i> sp. IMP-S02 | Resting cells | Straight-run diesel oil | 1807 | 59 | | |
| <i>Rhodococcus erythropolis</i> LSSE8-1 | Growing cells | HDS-treated diesel oil | 500 | Up to 60 | | 168 |
| <i>Rhodococcus erythropolis</i> I-19 | Resting cells/Culture suspension | HDS-treated diesel | 248 | 79.5 | 30 | 24 |
| <i>Rhodococcus</i> sp. ECRD-1 | Resting cells | HDS-treated-middle distillate petroleum (149–428 °C) | 1850 | 66.8 | 30 | 24 |
| | Growing cells | Middle-distillate fraction of Oregon basin crude oil (232–343 °C) | 21,700 | 8.1 | 25 | 168 |

5.2 Εναλλακτικές επιλογές

5.2.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)

Το LNG είναι ένα ορυκτό καύσιμο που περιέχει μεθάνιο ως κύριο συστατικό. Η παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου αυξάνεται κατά μέσο όρο 2,1% ετησίως, ενώ η παγκόσμια κατανάλωση κατά 1,7% ετησίως. Επί του παρόντος, το LNG αντιπροσωπεύει το πρώτο και πιθανότερο εναλλακτικό καύσιμο που πρέπει να θεωρηθεί ως γνήσιο αντικαταστάτη του HFO για τα πλοία. Η υιοθέτηση του LNG καθοδηγείται από την εξέλιξη των τιμών των καυσίμων, την τεχνολογία, την αυξημένη διαθεσιμότητα αερίου και την ανάπτυξη των κατάλληλων υποδομών. [74]

Το LNG είναι φυσικό αέριο που γίνεται υγρό σε θερμοκρασία -160°C. Το υγροποιημένο αέριο καταλαμβάνει όγκο που αντιστοιχεί στο 1/600 του προϊόντος σε αέρια κατάσταση, γεγονός που καθιστά αποδοτική την αποθήκευση στο πλοίο ως αποθήκη. Σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται από πλοία, το LNG έχει πολύ χαμηλές εκπομπές οξειδίου του θείου (SO_x), οξειδίου του αζώτου (NO_x) και σωματιδιακής ύλης (PM). Οι εκπομπές NO_x μειώνονται έως και 85-

90% σε σύγκριση με το βαρύ μαζούτ, ενώ των SOx και PM κοντά στο 100% και του CO₂ κατά περίπου 15-20%. [74]

Οι εξελιγμένοι κινητήρες LNG και οι κρουγονικές δεξαμενές καυσίμου με διπλά τοιχώματα απαιτούν σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου, βεβαίως σε σύγκριση με πλοία με πετρέλαιο. Οι διάφορες αναθεωρημένες μελέτες παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία κόστους κατασκευής για πλοία με καύσιμο LNG ή κόστη μετατροπής για υπάρχοντα πλοία. Το παρατηρούμενο εύρος κόστους συνδέεται εν μέρει με τον σχεδιασμό του πλοίου, τον τύπο του κινητήρα (με διπλό καύσιμο ή κινητήρα LNG) και το μέγεθος της δεξαμενής καυσίμου (δηλαδή εξαρτάται από τη συχνότητα επαναπλήρωσης). Συνολικά, το εκτιμώμενο κόστος για ένα πλοίο με καύσιμο LNG είναι από 20 έως 25% υψηλότερο σε σύγκριση με ένα πλοίο ισοδύναμου πετρελαίου. Οι Baumgart και Olsen (2010) επισημαίνουν ότι το δαπανηρό σύστημα LNG θα πωληθεί σε χαμηλότερη τιμή μόλις εφαρμοστεί η τεχνολογία σε μεγάλη κλίμακα, αλλά η ακριβής μείωση του κόστους είναι αδύνατο να προβλεφθεί. Όλα εξαρτώνται από την άποψη των πλοιοκτητών σχετικά με το εάν το υψηλότερο κόστος κατασκευής μπορεί να δικαιολογηθεί από χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και ταξιδιού με τη χρήση LNG. Επιπλέον, ορισμένες μελέτες δείχνουν ότι το κόστος για ένα νεότευκτο πλοίο με καύσιμο LNG είναι μικρότερο από το κόστος μετατροπής ενός παρόμοιου υπάρχοντος πλοίου. Το LNG είναι επομένως πιο εφικτό για νέα πλοία. [74][75]

Στον Πίνακα 9 φαίνονται η κατανάλωση των HFO και MDO σε σχέση με το LNG, στον ίδιο κινητήρα, καθώς και το αντίστοιχο κόστος, με βάση δεδομένα από την Wärtsilä (2015).

Πίνακας 10: Δεδομένα από κινητήρα 9 κυλίνδρων της Wärtsilä. [76]

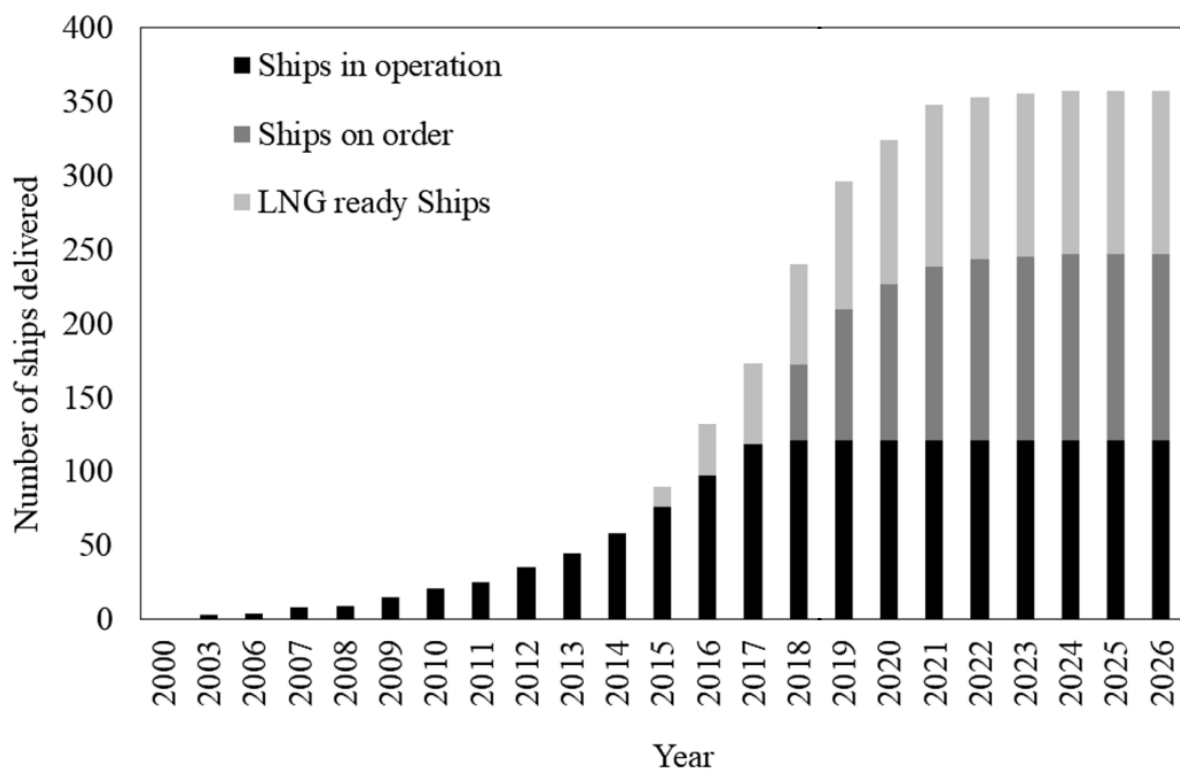
| Fuel | Specific consumption $\frac{gr}{kWh}$ | Daily consumption (est.) $\frac{tons}{day}$ | Daily costs $\frac{USD}{day}$ |
|------|--|--|----------------------------------|
| HFO | 178.9 | 141.2 | 34.5 k |
| MDO | 178.9 | 141.2 | 52.3 k |
| LNG | 138.7 | 109.5 | 20 k |

Η μεγαλύτερη αντίσταση, ωστόσο, στην υιοθέτηση του LNG παγκοσμίως είναι η έλλειψη υποδομών και εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού καυσίμων. Αλλά υπάρχει τρόπος να ξεπεραστεί το πρόβλημα. Οι κορυφαίες εταιρείες παρέχουν κινητήρες διπλού καυσίμου που μπορούν να λειτουργήσουν τόσο με LNG όσο και με συμβατικά LFO, HFO ή υγρά βιοκαύσιμα. Το LNG ως καύσιμο είναι πλέον μια

δοκιμασμένη και διαθέσιμη λύση. Οι εμπορικές ευκαιρίες του LNG είναι ενδιαφέρουσες για διάφορα νέα έργα κατασκευής και μετατροπής. Τα τελευταία 16 χρόνια, τα πλοία που χρησιμοποιούν το LNG ως καύσιμο αυξάνονται.

Το σχήμα 3 δείχνει την ανάπτυξη ποδιών με καύσιμο LNG που ξεκίνησε το 2000. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το 2015 περίπου 76 πλοία λειτουργούσαν με LNG ενώ 88 λειτουργούσαν το 2018. Η πρόβλεψη για το 2026 είναι να φτάσει σε έναν αριθμό 357 πλοίων με καύσιμο LNG.[77]

Εικόνα 19: Ανάπτυξη στόλου πλοίων με LNG ως καύσιμο. [77]



5.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Ηλιακή ενέργεια

Η ιδέα της χρήσης ηλιακής ενέργειας για την τροφοδοσία πλοίων δεν είναι νέα. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα ερευνητικών μελετών, πειραμάτων και πρωτοτύπων που κατάφεραν να το κάνουν αυτό. Ανάμεσα σε αυτά τα πρωτότυπα, υπάρχουν πλοία που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια ως βοηθητικό μέσο τροφοδοσίας για να καλύψουν τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου, μαζί με άλλες ανανεώσιμες πηγές, ακόμη και ως μοναδική πηγή ενέργειας. Ωστόσο, η ηλιακή ενέργεια δεν θεωρείται ότι μπορεί να τροφοδοτήσει πλήρως τα πλοία, λόγω της σχετικά μικρής ενεργειακής πυκνότητας που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά. [78]

Εικόνα 20: Εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα σε πλοίο. [78]



Η ανάγκη στροφής σε πιο πράσινες τεχνολογίες στον ναυτικό τομέα οδήγησε στα πρώτα βήματα εφαρμογής της ηλιακής ενέργειας ως πηγής ενέργειας στα σύγχρονα πλοία. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα είναι το Auriga Leader, ένα πλοίο μεταφοράς αυτοκινήτων για την Toyota, το 2009. Το σκάφος έχει μήκος περίπου 200 μέτρα, ζυγίζει περίπου 60.000 τόνους και μεταφέρει έως και 6200 αυτοκίνητα, μεταφέροντάς τα από τα εργοστάσια της Toyota Motor Corporation στην Ιαπωνία στο Λιμάνι του Λονγκ Μπιτς. Στο Auriga Leader, τοποθετήθηκαν 328 ηλιακά πάνελ στην κορυφή του, παρέχοντας μέγιστη ισχύ εξόδου 40 KW. Αυτή ήταν η πρώτη φορά που ένα πλοίο μεταφοράς χρησιμοποίησε ηλιακή ενέργεια για να καλύψει μέρος των αναγκών του σε ηλεκτρική ενέργεια, αντικαθιστώντας τους βοηθητικούς κινητήρες ντίζελ. Σε εκείνη την περίπτωση, η εγκατάσταση του πάνελ όχι μόνο έκανε το Auriga Leader πιο πράσινο μειώνοντας τους ρύπους που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, αλλά το έκανε επίσης πιο οικονομικό και αποτελεσματικό μειώνοντας την κατανάλωση ντίζελ του σκάφους. [78]

Αιολική ενέργεια

Τις δεκαετίες του 1970 και του 1980, ο Ιαπωνικός Σύνδεσμος Ανάπτυξης Μηχανημάτων (Japan Machinery Development Association, JAMDA) συμμετείχε στην ανάπτυξη άκαμπτων πανιών και αυτό οδήγησε σε περισσότερα από δώδεκα πλοία να εφοδιαστούν με πανιά JAMDA, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. [78]

Εικόνα 21: Άκαμπτο πανί JAMDA στο Teramoto Iron Works τη δεκαετία του 1980. [78]



Αυτά τα πανιά απέδειξαν ότι η χρήση άκαμπτων πανιών σε σύγχρονα μηχανοκίνητα πλοία θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων, με μειώσεις περίπου 30% να αναφέρονται υπό ορισμένες συνθήκες.

Σήμερα, η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ναυτιλία δέχεται σημαντική πίεση προκειμένου να μειώσει τις εκπομπές της. Επιπλέον, οι τεχνολογικές ανακαλύψεις και βελτιώσεις έχουν εξασφαλίσει μια σταθερή τεχνογνωσία σε πολλές πράσινες τεχνολογίες. Στον ναυτικό τομέα, έχουν γίνει προσπάθειες εφαρμογής πράσινων τεχνολογιών επί του σκάφους. Όσον αφορά την αιολική ενέργεια, δύο αντιπροσωπευτικές τεχνολογίες μοιράζονται την ίδια φιλοσοφία με τα άκαμπτα και περιστροφικά πανιά αντίστοιχα, αλλά αυτή τη φορά, ανακαλύψεις στον τομέα των υλικών (π.χ. κράματα, ανθρακονήματα) μαζί με την ψηφιοποίηση και την παρακολούθηση (π.χ. αυτοματισμοί και αισθητήρες) μπορεί να κάνει τη διαφορά προς την επιτυχή εφαρμογή. Ξεκινώντας από την ιδέα του άκαμπτου πανιού, η ιδέα είναι ίδια με αυτή του 1980. Η κύρια διαφορά είναι ότι αυτή τη φορά, το πανί είναι εξοπλισμένο με πολυάριθμους αισθητήρες, οι οποίοι σε συνδυασμό με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα δίνουν στο πανί τη δυνατότητα να στραφεί

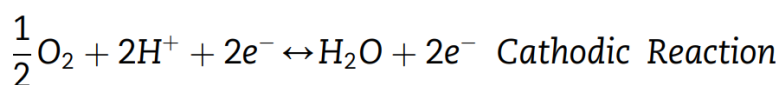
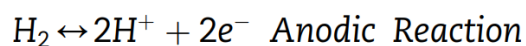
προς το συγκεκριμένο γωνία, ώστε να παρέχεται η βέλτιστη δύναμη πρόωσης. Επιπλέον, τέτοια άκαμπτα πανιά φαίνεται να είναι ικανά να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα την ηλιακή ενέργεια έχοντας προσαρτημένα πάνω τους φωτοβολταϊκά πάνελ. Ένα παράδειγμα αυτής της τεχνολογίας φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. [78]

Εικόνα 22: Aquarius Marine Renewable Energy MRE. [78]



5.2.4 Κυψέλες καυσίμου (Fuel cells)

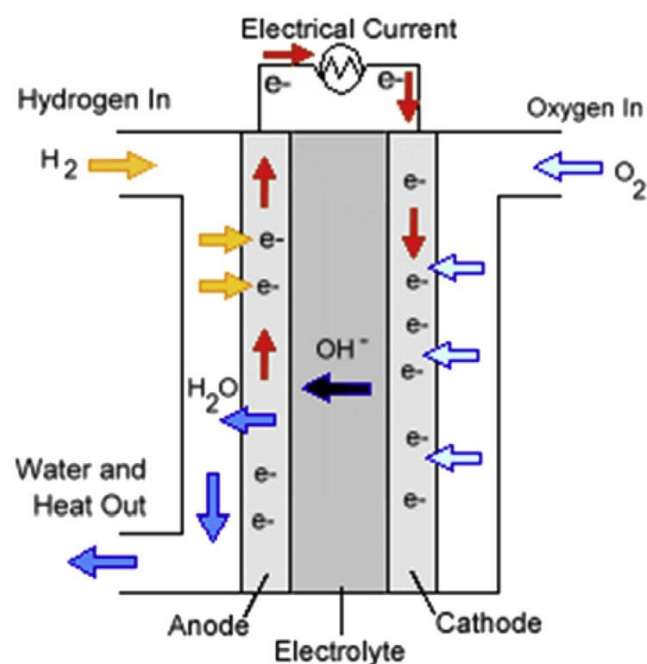
Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή στην οποία η χημική ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο πυρήνας των κυψελών καυσίμου είναι το μοναδιαίο στοιχείο, το συστατικό μέσα στο οποίο η συσκευή μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη σε επαφή με μια άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και μια κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο). [79]



Η Ακτοφυλακή των Ηνωμένων Πολιτειών (USCG) διερεύνησε τον αντίκτυπο της αντικατάστασης τεσσάρων γεννητριών ντίζελ με κυψέλες καυσίμου σε ένα από τα σκάφη της ακτοφυλακής της με ηλεκτρική πρόωση ντίζελ μέσω κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Στο σύστημα VINDICATOR CGC οι κυψέλες καυσίμου μετατράπηκαν για πρόωση και βοηθητική ισχύ. Το VINDICATOR είναι ένα πλοίο κατηγορίας T-AGOS, μήκους 68,3 m, που προωθείται από τέσσερις ηλεκτρικές γεννήτριες ντίζελ Caterpillar με κινητήρες πρόωσης συνεχούς ρεύματος. Έγιναν όλες οι απαραίτητες δομικές αλλαγές για την τροφοδοσία καυσίμου, τόσο στην εξάτμιση όσο και σε όλα τα σχετικά συστήματα. Αυτό συνεπαγόταν την αντικατάσταση των τεσσάρων κύριων γεννητριών ντίζελ με τέσσερις μονάδες κυψελών καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος. Για καύσιμο επιλέχθηκε το F-76 που χρησιμοποιεί το NATO και ουσιαστικά είναι ένα αποσταγμένο καύσιμο πλοίων με συγκέντρωση οξειδίων του θείου μικρότερη από 1% κατά βάρος. [80]

Χάρη σε μικρές μόνο τροποποιήσεις, οι μονάδες κυψελών καυσίμου ήταν συμβατές με τα συστήματα του σκάφους. Αυτές οι μονάδες είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις γεννήτριες ντίζελ που αντικαθίστανται. Ως αποτέλεσμα, οι μη δομικές πλευρικές πλάκες μέσα στο δωμάτιο των γεννητριών ντίζελ έπρεπε να αφαιρεθούν. Τα υπάρχοντα κυκλώματα αέρα και εξάτμισης, καθώς και τα συστήματα παροχής καυσίμου, θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν με μικρές τροποποιήσεις. Οι επιδόσεις του σκάφους όσον αφορά τη σταθερότητα και τη συμπεριφορά στη θάλασσα δεν επηρεάστηκαν πρακτικά. Μόνο ο χώρος για ελιγμούς αλλοιώθηκε ελαφρά. Η μεγάλη αυτονομία επιτεύχθηκε λόγω της υψηλής απόδοσης των κυψελών καυσίμου. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ήταν τεχνικά εφικτή η εγκατάσταση και η λειτουργία κυψελών καυσίμου σε αυτό το σκάφος. [80]

Εικόνα 23: Σχηματική απεικόνιση μίας κυψέλης καυσίμου. [80]



Ένα παράδειγμα συστημάτων κυψελών καυσίμου στο εμπορικό ναυτικό είναι το έργο Methanol Auxiliary Power Unit, METHAPU, (Βοηθητική Μονάδα Ενέργειας Μεθανόλης), που χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο του προγράμματος FP6. Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου με μεθανόλη (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) χρησιμοποιήθηκαν για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο MV Undine Ro-Ro. [80]

Τα χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου ήταν:

- Πρωτότυπο κυψελών καυσίμου Wartsila WFC20.
- Τεχνολογία: Solid Oxide Fuel Cells υψηλής θερμοκρασίας
- Θερμοκρασία λειτουργίας: 700° C-800° C
- Καύσιμο: Μεθανόλη και αέρας
- Ηλεκτρική απόδοση: 45%.
- Έξοδος: 20 kW, 400 VAC, 3 φάσεις.
- Διαστάσεις: 4,5 m μήκος, 1,2 m πλάτος και 1,7 m ύψος.

Αποδείχθηκε εξαιρετικά αποδοτικό και σχετικά καθαρό όσον αφορά τα καυσαέρια. Με αυτές τις μονάδες, δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει ειδικός εξοπλισμός για το χειρισμό και την επεξεργασία των καυσαερίων. Τα οφέλη από τη χρήση της μεθανόλης ως καυσίμου είναι ότι είναι δυνητικά βιώσιμη, έχει υψηλή ενεργειακή ογκομετρική πυκνότητα, είναι υγρή και είναι διαθέσιμη σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, οι κύριοι κίνδυνοι που συνδέονται με τη χρήση μεθανόλης στο πλοίο σχετίζονται με τους κινδύνους πυρκαγιάς και έκρηξης. Το σημείο ανάφλεξης του είναι 12,2° C. Υπάρχει πιθανότητα το πλήρωμα να εισπνεύσει τοξίνες ή το δέρμα τους να έρθει σε επαφή με αυτές. Η μεθανόλη της κυψέλης καυσίμου πρέπει να αποθηκεύεται σε ξεχωριστό μέρος. [80]

5.2.5 Βιοκαύσιμα

Τα βιοκαύσιμα είναι μια εναλλακτική λύση καυσίμου που έχει μεγάλες δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα βιοκαύσιμα παράγονται από βιομάζα, όπως δασικά και αγροτικά υπολείμματα, σάκχαρα φυτικής προέλευσης, φυτικά έλαια και φύκια. Σε σύγκριση με τα καύσιμα πετρελαίου, τα βιοκαύσιμα περιέχουν σημαντικά μικρότερες ποσότητες θείου και αζώτου και έτσι παράγουν χαμηλότερες εκπομπές SOx και NOx. Επειδή η βιομάζα είναι ανανεώσιμη, τα βιοκαύσιμα μπορούν να γίνουν βιώσιμα καύσιμα για τη ναυτιλία. Τα βιοκαύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αυτόνομα ή αναμειγμένα με άλλα καύσιμα. [81]

Βιοντίζελ

Είναι επίσης γνωστό ως μεθυλεστέρας λιπαρών οξέων (FAME), που παράγεται από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη μέσω της μετεστεροποίησης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κινητήρες ντίζελ πλοίων χωρίς τροποποίηση των κινητήρων. Συχνά αναμιγνύεται με ναυτικό ντίζελ σύμφωνα με τις προδιαγραφές ISO 8217:2017. Τα πλεονεκτήματα του βιοντίζελ περιλαμβάνουν τις καλές του ιδιότητες ανάφλεξης και λιπαντικότητας μαζί με χαμηλές εκπομπές SO_x, CO, αερίων θερμοκηπίου και μικροσωματιδίων. [2]

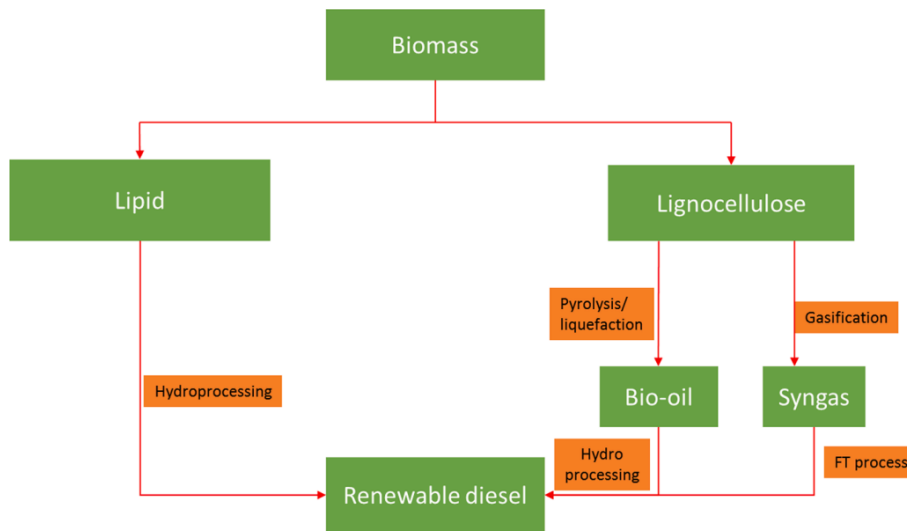
Ως μειονέκτημα, το βιοντίζελ μπορεί να φράξει τα φίλτρα εάν χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασία κάτω από 10°C και να καταστρέψει τους κινητήρες. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, οι δεξαμενές καυσίμου μπορούν να είναι θερμαινόμενες ή μπορούν να αναμειχθούν με πρόσθετα όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη και η κηροζίνη. Επί του παρόντος, το βιοντίζελ παράγεται εμπορικά με τη χρήση φυτικών ελαίων. Το φυτικό λάδι αντιπροσωπεύει περίπου το 80 % της παραγωγής βιοντίζελ. Παρόλα αυτά, το υψηλό κόστος των φυτικών ελαίων κάνει το βιοντίζελ πιο ακριβό από το ορυκτό ντίζελ. [2]

Ανανεώσιμο ντίζελ

Το ανανεώσιμο ντίζελ (ονομάζεται επίσης «πράσινο» ντίζελ) είναι ένα καύσιμο τύπου υδρογονάνθρακα που παράγεται από πηγές βιομάζας όπως λιπίδια (φυτικά έλαια, ζωικά λίπη και άλγες) και κυτταρινούχα βιομάζα (υπολείμματα καλλιεργειών, ξυλώδης βιομάζα). Πληροί τις προδιαγραφές ASTM D975 στις Ηνωμένες Πολιτείες και EN 590 στην Ευρώπη. Σε αντίθεση με το βιοντίζελ, που είναι ένας εστέρας και έχει διαφορετικές χημικές ιδιότητες από το πετρελαϊκό ντίζελ, το ανανεώσιμο ντίζελ είναι χημικά το ίδιο με το πετρέλαιο ντίζελ, που αποτελείται από υδρογονάνθρακες. Η παραγωγή ντίζελ από ανανεώσιμες πηγές μέσω υδροεπεξεργασίας λιπιδίων είναι η μόνη εμπορευματοποιημένη διαδικασία από τώρα. [2]

Σήμερα σχεδόν όλο το ανανεώσιμο ντίζελ που διατίθεται στην αγορά παράγεται από φυτικό έλαιο, σε μια αυτόνομη μονάδα υδροεπεξεργασίας. Το ανανεώσιμο ντίζελ μπορεί να αναμειχθεί με καύσιμα πλοίων για να πληροί τους κανονισμούς του IMO για το καπάκι του θείου, αλλά τα οικονομικά της παραγωγής ανανεώσιμου ντίζελ από φυτικό έλαιο δεν είναι πολλά υποσχόμενα λόγω του υψηλού κόστους των φυτικών ελαίων. [82]

Εικόνα 24: Διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής ανανεώσιμου ντίζελ. [82]



6. Συμπεράσματα

Η ναυτιλία αναπτύσσεται ραγδαία και οι κοινωνίες εξαρτώνται από αυτήν για τη μεταφορά εμπορευμάτων. Καθώς αυξάνεται η εξάρτηση από τη ναυτιλία, αυξάνονται και οι εκπομπές ρύπων. Είναι προς το συμφέρον όλων να γίνει όσο το δυνατόν πιο βιώσιμο και να ρυθμιστεί ο κλάδος. Ο IMO έχει θέσει αυστηρά όρια στις εκπομπές SO_x, NO_x, αερίων θερμοκηπίου και μικροσωματιδίων. Καθώς ο ναυτιλιακός τομέας αναζητά επιλογές συμμόρφωσης, ταυτόχρονα αναπτύσσονται και νέα καύσιμα. Οι απαιτήσεις είναι άφθονες για τα υγρά καύσιμα, όπως υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ιξώδες, σημείο ανάφλεξης, σημείο ροής, σταθερότητα. Ορισμένες επιλογές καυσίμου που έχουν αναπτυχθεί είναι συμβατικά καύσιμα, εμπλουτισμένα με επιπρόσθετες ουσίες υψηλής λιπαντικής ικανότητας, και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο όπως το VLSFO ή το ULSFO. Αυτή είναι μια ελκυστική επιλογή γιατί δεν απαιτούνται αλλαγές κινητήρα καθώς χρησιμοποιούν τα ίδια συστήματα. Με βάση τις τρέχουσες συνθήκες στο κόστος των πλυντρίδων και το χάσμα τιμών μεταξύ ULSFO και HFO, η εναλλαγή καυσίμου προτιμάται για συγκεκριμένες διαδρομές. Ωστόσο, εάν η διαδρομή έχει μεγάλη απόσταση που διέρχεται μέσα από περιοχή SECA, κάτι που είναι πολύ πιθανό, με τις σκληρές περιβαλλοντικές πολιτικές στη ναυτιλία, η επιλογή πλυντρίδων θα είναι η προτιμώμενη. Αυτό περιλαμβάνει διαδρομές μικρών αποστάσεων, όπου μεγάλο ποσοστό του θαλάσσιου δρομολογίου βρίσκεται εντός των SECA. Για τις θαλάσσιες μεταφορές, όπου η απόσταση εντός SECA είναι μόνο ένα κλάσμα της διαδρομής μετ' επιστροφής, η εναλλαγή καυσίμου είναι καλύτερη επιλογή. Το χάσμα τιμών μεταξύ ULSFO και HFO είναι επίσης κρίσιμος παράγοντας στην επιλογή συμμόρφωσης. Όταν το κενό είναι μεγάλο, η εγκατάσταση πλυντρίδας αποτελεί πιο ελκυστική επιλογή, καθώς μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα με τη χρήση HFO. Επίσης, οι κρατικές επιδοτήσεις, μπορούν να καταστήσουν τις πλυντρίδες μια πιο ελκυστικές. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι οι πλυντρίδες είναι πιο αποτελεσματικές στη μείωση των εκπομπών SO_x και CO₂. [88]

Οι αλλαγές, που έχουν ήδη ξεκινήσει να πραγματοποιούνται, στην παγκόσμια ναυτιλία θα είναι σταδιακές.

Προκειμένου να ανταπεξέλθουν οικονομικά στην νέα πραγματικότητα, οι εμπλεκόμενοι με τη ναυτιλία οφείλουν να προσαρμοστούν. Αυτό αφορά είτε την αριστοποίηση διαδικασιών κατασκευής και παραγωγής, δρομολογίων και λειτουργιών με σκοπό κυρίως την εξοικονόμηση χρημάτων για την κάλυψη του νέου κόστους που προκύπτει από τον IMO 2020.

Ταυτόχρονα όμως με αυτές τις αλλαγές, οι προβλέψεις για τον αντίκτυπο του νέου κανονισμού στο περιβάλλον και στον άνθρωπο αφορούν σημαντική μείωση των εκπομπών θείου από τη ναυτιλία, σε

ποσοστό 77%. Κατ' επέκταση, άμεσο αποτέλεσμα είναι η μείωση των παθήσεων και των πρόωρων θανάτων που συνδέονται μ' αυτούς.

Από την άλλη πλευρά, με αλλαγή σε τύπους βιοκαυσίμων, όχι μόνο μειώνονται οι εκπομπές SOx αλλά μπορούν επίσης να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η διεθνής ναυτιλία θα πρέπει να προετοιμαστεί για μελλοντικούς κανονισμούς του IMO εάν χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά καύσιμα εκτός πετρελαίου. Αυτά περιλαμβάνουν LNG, κυψέλες καυσίμου, καύσιμα με βάση το αλκοόλ, βιοκαύσιμα και ηλιακή ενέργεια. Το μειονέκτημα αυτών των καυσίμων είναι η ανάγκη τροποποίησης των συστημάτων του πλοίου καθώς έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και ανάγκες αποθήκευσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, έχουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα ή υψηλότερο κόστος παραγωγής. Αυτές οι εναλλακτικές λύσεις εξακολουθούν να ερευνώνται και να αναπτύσσονται ως βιώσιμες επιλογές, αλλά προς το παρόν, τα μικρότερα σκάφη μπορούν να τις επιλέξουν για να τροφοδοτήσουν σύντομα ταξίδια. Τα βιοκαύσιμα μπορούν να χρησιμεύσουν ως ναυτιλιακά καύσιμα βραχυπρόθεσμα, ωστόσο, πρέπει να γίνει περισσότερη έρευνα για να γίνουν τα βιοκαύσιμα οικονομικά αποδοτική επιλογή για τη ναυτιλία.

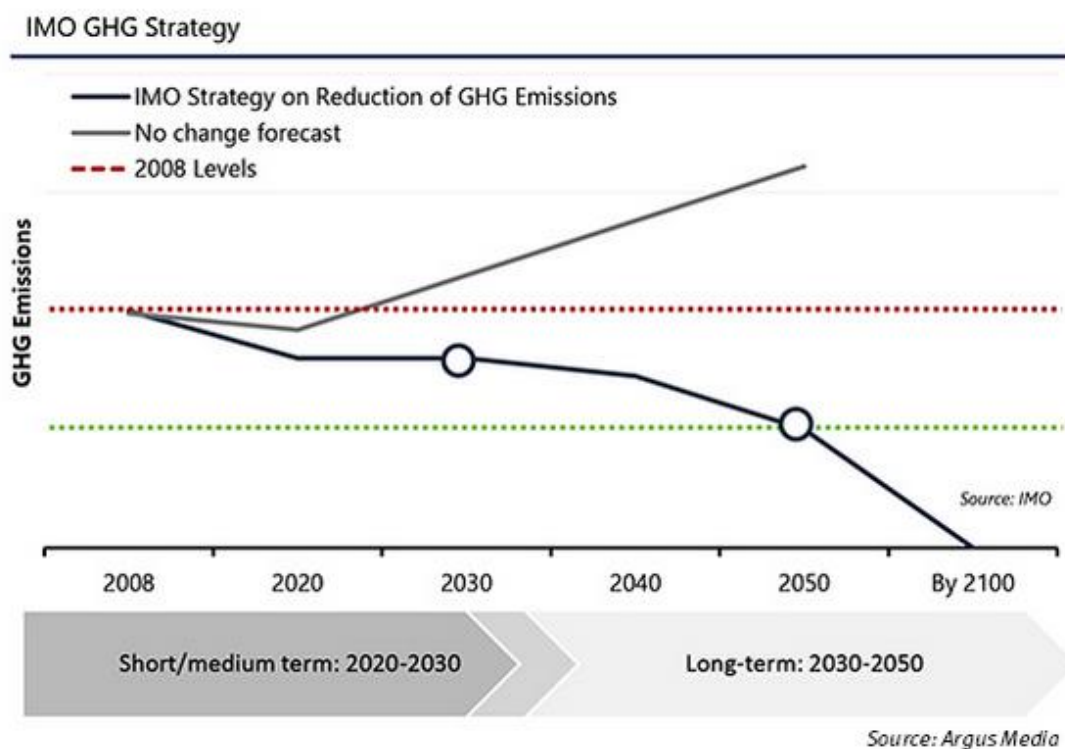
Καθώς οι πλοιοκτήτες προσπαθούν να βρουν την πιο αποτελεσματική επιλογή συμμόρφωσης, μπορεί να επιλέξουν να συνδυάσουν καύσιμα ή να χρησιμοποιήσουν υβριδικά συστήματα. Προς το παρόν, για να διατηρηθεί το επίπεδο παραγωγής, τα περισσότερα πλοία βασίζονται σε μείγματα LSFO και συστήματα καθαρισμού καυσαερίων. [2]

Τέλος, όλα τα μέρη που εμπλέκονται με τη διεθνή ναυτιλία και καταβάλουν προσπάθειες για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων του IMO 2020, θα πρέπει να προετοιμάζονται και για τους μελλοντικούς κανονισμούς.

7. Μελλοντικοί Κανονισμοί

Τα σχέδια του IMO σε βάθος δεκαετιών έχουν ως τελικό στόχο τις μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), και κυρίως CO₂. Οι νέοι κανονισμοί έχουν ως στόχο την μείωση τουλάχιστον κατά 40% των εκπομπών CO₂ έως το 2030 και συνέχιση των προσπαθειών προς περεταίρω μείωση 70% έως το 2050, αμφότερα σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008. Επιπλέον, η νέα στρατηγική έχει ως τελικό στόχο μηδενικές εκπομπές CO₂ από την παγκόσμια ναυτιλία έως το 2100. Πάντως η εναλλαγή σε «καθαρότερες» μορφές ενέργειας και η βελτιστοποίηση της ναυσιπλοΐας θα μπορούσαν δυνητικά να αντιμετωπίσουν με επιτυχία τις επιπτώσεις των νέων κανονισμών. [89]

Εικόνα 25: Η Στρατηγική του IMO για τη σταδιακή εξάλειψη των εκπομπών GHG. [90]



8. Βιβλιογραφία

1. Herdzyk, J. Decarbonization of Marine Fuels—The Future of Shipping. *Energies* 2021, 14, 4311. <https://doi.org/10.3390/en14144311>
2. Sundaramurthy Vedachalam, Nathalie Baquerizo, Ajay K. Dalai, Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options, *Fuel*, Volume 310, Part A, 2022, 122243, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122243>
3. Ibrahim S. Seddiek, Mohamed M. Elgohary, Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SO_x and NO_x emissions, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Volume 6, Issue 3, 2014, Pages 737-748, ISSN 2092-6782, <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0209>
4. Thomas JF, Sluder CS, Kass MD, Theiss T. A Guide to Fuel, Lubricant, and Engine Concerns Relative to the IMO 2020 Fuel Oil Sulfur Reduction Mandate. 2019
5. Atkinson, D. (2017). Determining Catalytic Fines Concentrations in Heavy Fuel Oils. *MTZ Industrial*, 7(1), 50–57. doi:10.1007/s40353-017-0003-4
6. Karonis, D., Zahos-Siagos, I., Filimon, D., & Vasileiou, F. (2017). A multivariate statistical analysis to evaluate and predict ignition quality of marine diesel fuel distillates from their physical properties. *Fuel Processing Technology*, 166, 299–311. doi:10.1016/j.fuproc.2017.06.021
7. Fang, L., Zhang, X., Ma, J., & Zhang, B. (2012). Investigation into a Pour Point Depressant for Shengli Crude Oil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(36), 11605–11612. doi:10.1021/ie301018r
8. Winnes, H., & Fridell, E. (2009). Particle Emissions from Ships: Dependence on Fuel Type. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(12), 1391–1398. doi:10.3155/1047-3289.59.12.1391
9. Sui, C., de Vos, P., Stapersma, D., Visser, K., & Ding, Y. (2020). Fuel Consumption and Emissions of Ocean-Going Cargo Ship with Hybrid Propulsion and Different Fuels over Voyage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 588. doi:10.3390/jmse8080588
10. IMO. Sulphur 2020 – cutting sulphur oxide emissions. International Maritime Organization 2019. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx> (accessed 30/10/2022)
11. IMO. Nitrogen oxides (NO_x) – Regulation 13. Air Pollut GHG Emiss 2013:1. [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-Regulation-13.aspx) (accessed 30/10/2022).

12. Olmer N., Comer B., Roy B., Mao X., Rutherford D. Greenhouse Gas Emissions From Global Shipping, 2013–2015. *International Council for Clean Transportation 2017*:1–25.
13. IMO. Greenhouse Gas Emissions - Fourth IMO GHG Study 2020. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/GHG-Emissions.aspx> (accessed 30/10/2022).
14. EPA US. Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM) | Particulate Matter (PM) Pollution | US EPA. Environmental Protection Agency 2020.
15. Winnes H, Fridell E. Particle Emissions from Ships: Dependence on Fuel Type. *Journal of the Air & Waste Management Association 2009*;59(12):1391–8. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1391>.
16. Seddiek IS, Elgohary MM. Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SOx and NOx emissions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 2014*;6(3):737–48. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0209>.
17. IMO. Brief History of IMO. <https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx> (accessed 31/10/2022).
18. IMO. Air Pollution, Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/AirPollution-Default.aspx> (accessed 31/10/2022).
19. IMO. Prevention of Air Pollution from Ships. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx> (accessed 31/10/2022).
20. IMO. IMO 2020 – Cutting Sulphur Oxide Emissions. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx> (accessed 31/10/2022).
21. MARPOL, ANNEX VI-Regulations for the Preventions of Air Pollution from Ships, Chapter 3-Requirements for control of emissions from ships, Regulation 14-Sulphur Oxides SOx. http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/r14.htm (accessed 4/11/2022)
22. Christos Sigalas, Financial impact of the IMO 2020 regulation on dry bulk shipping, *Maritime Transport Research*, Volume 3, 2022, 100064, ISSN 2666-822X, <https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100064>
23. Li, K., Wu, M., Gu, X., Yuen, K. F., & Xiao, Y. (2020). Determinants of ship operators' options for compliance with IMO 2020. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102459. doi:10.1016/j.trd.2020.102459

24. Lindstad, H. E., Rehn, C. F., & Eskeland, G. S. (2017). *Sulphur abatement globally in maritime shipping. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 303–313. doi:10.1016/j.trd.2017.09.028
25. Panasiuk, I., & Turkina, L. (2015). *The evaluation of investments efficiency of SO_x scrubber installation. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40, 87–96. doi:10.1016/j.trd.2015.08.004
26. Ma, H., Steernberg, K., Riera-Palou, X., & Tait, N. (2012). *Well-to-wake energy and greenhouse gas analysis of SO_x abatement options for the marine industry. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(4), 301–308. doi:10.1016/j.trd.2012.01.005
27. Solakivi, T., Laari, S., Kiiski, T., Töyli, J., & Ojala, L. (2019). *How shipowners have adapted to sulphur regulations – evidence from finnish seaborne trade. Case Studies on Transport Policy*. doi:10.1016/j.cstp.2019.03.010
28. Lindstad, H., Eskeland, G. S., Psaraftis, H., Sandaas, I., & Strømman, A. H. (2015). *Maritime shipping and emissions: A three-layered, damage-based approach. Ocean Engineering*, 110, 94–101. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.09.02
29. Jiang, L., Kronbak, J., & Christensen, L. P. (2014). *The costs and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 28, 19–27. doi:10.1016/j.trd.2013.12.005
30. Gu, Y., & Wallace, S. W. (2017). *Scrubber: A potentially overestimated compliance method for the Emission Control Areas. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 51–66. doi:10.1016/j.trd.2017.06.024
31. Kim, A.-R., & Seo, Y.-J. (2018). *The reduction of SO_x emissions in the shipping industry: The case of Korean companies. Marine Policy*. doi:10.1016/j.marpol.2018.11.024
32. Acciaro, M. (2014). *Real option analysis for environmental compliance: LNG and emission control areas. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 28, 41–50. doi:10.1016/j.trd.2013.12.007
33. Halff, A., Younes, L., & Boersma, T. (2019). *The likely implications of the new IMO standards on the shipping industry. Energy Policy*, 126, 277–286. doi:10.1016/j.enpol.2018.11.033
34. Winnes, H., Styhre, L., & Fridell, E. (2015). *Reducing GHG emissions from ships in port areas. Research in Transportation Business & Management*, 17, 73–82. doi:10.1016/j.rtbm.2015.10.008
35. Vierth, I., Karlsson, R., & Mellin, A. (2015). *Effects of More Stringent Sulphur Requirements for Sea Transports. Transportation Research Procedia*, 8, 125–135. doi:10.1016/j.trpro.2015.06.048
36. Rehmatulla, N., Calleya, J., & Smith, T. (2017). *The implementation of technical energy efficiency and CO₂ emission reduction measures in shipping. Ocean Engineering*, 139, 184–197. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.04.02

37. Maloni, M., Paul, J. & Gligor, D. *Slow steaming impacts on ocean carriers and shippers*. *Maritime Economics & Logistics* 15, 151–171 (2013).
<https://doi.org/10.1057/mel.2013.2>
38. N. Cabrera, “*The Largest Container Ships in the World: CSCL Globe, MSC Oscar*”, Ship Lilly, December 26, 2014, <http://www.shiplilly.com/blog/largestships-world-cscl-globe-msc-oscar/>. (accessed 8/11/2022)
39. Eguíluz, V., Fernández-Gracia, J., Irigoien, X. et al. *A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010–2014*. *Scientific Reports* 6, 30682 (2016).
<https://doi.org/10.1038/srep30682>
40. Lasserre, F., & Pelletier, S. (2011). *Polar super seaways? Maritime transport in the Arctic: an analysis of shipowners’ intentions*. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1465–1473. doi:10.1016/j.jtrangeo.2011.08.00
41. Wu P-C, Lin C-Y. *Cost-Benefit Evaluation on Promising Strategies in Compliance with Low Sulfur Policy of IMO*. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021; 9(1):3.
<https://doi.org/10.3390/jmse9010003>
42. Thalís P.V. Zis, Kevin Cullinane & Stefano Ricci (2022) *Economic and environmental impacts of scrubbers investments in shipping: a multi-sectoral analysis*, *Maritime Policy & Management*, 49:8, 1097-1115, doi: 10.1080/03088839.2021.1937742
43. Den Boer, L., and M. J. J. t Hoen. 2015. *Scrubbers: An Economic and Ecological Assessment*. CE Delft. The Netherlands: Delft.
44. DNV GL 2018. “Global Sulphur Cap 2020.” *In Compliance options and implications for shipping—focus on scrubbers*. Hamburg, Germany
45. Hansen, J. P. (2012). “Exhaust Gas Scrubber Installed Onboard MV Ficaria Seaways”. *Public Test Report Environmental Protection Agency*, Danish Ministry of Environment, København.
46. Zis, T., and H. N. Psaraftis. 2019. “Operational Measures to Mitigate and Reverse the Potential Modal Shifts Due to Environmental Legislation.” *Maritime Policy & Management* 46 (1): 117–132. doi:10.1080/03088839.2018.1468938
47. Gorton, L., Hillenius, P., Ihre, R., Sandeværn, A., 2009. *Shipbroking and Chartering Practice*, 7th Ed. Informa, Oxon
48. Time Charter Equivalent (TCE), Understanding Time Charter Equivalent, Investopedia, <https://www.investopedia.com/terms/t/time-charter-equivalent-tce.asp> (accessed 8/11/2022)

49. Jerome M., *Implications for Shipowners and Charterers of the IMO 2020 Low Sulphur Regulations*, Haute école de gestion de Genève, International Business Management, 2020
50. <https://www.naturalgasintel.com/limited-infrastructure-may-hamper-initial-Ing-use-as-marine-fuel/> (accessed 2/1/2023)
51. https://www.researchgate.net/figure/Basic-classification-of-marine-scrubber-types-modified-from-Marine-Insight-2021_fig3_362490383 (accessed 2/1/2023)
52. <https://www.onthemosway.eu/the-rise-the-fallen-and-the-possible-solution-about-slow-steaming/?cn-reloaded=1> (accessed 2/1/2023)
53. <https://www.xindemarinenews.com/m/view.php?aid=12547> (accessed 2/1/2023)
54. Ji, J. S. (2020). *The IMO 2020 sulphur cap: a step forward for planetary health?* The Lancet Planetary Health, 4(2), e46–e47. doi:10.1016/s2542-5196(20)30002-4
55. Sofiev M, Winebrake JJ, Johansson L, et al. *Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs*. Nat Commun 2018; 9: 406.
56. IMO, MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE, 70th session Agenda item 5, AIR POLLUTION AND ENERGY EFFICIENCY, *Study on effects of the entry into force of the global 0.5% fuel oil sulphur content limit on human health*, MEPC 70/INF.34, 19 August 2016
57. Contini, D.; Merico, E. *Recent Advances in Studying Air Quality and Health Effects of Shipping Emissions*. Atmosphere 2021, 12, 92. <https://doi.org/10.3390/atmos12010092>
58. Hossain, M.N.; Park, H.C.; Choi, H.S. *A comprehensive review on catalytic oxidative desulfurization of liquid fuel oil*. Catalysts 2019, 9, 229, <https://doi.org/10.3390/catal9030229>
59. Ho, T. C. (2004). *Deep HDS of diesel fuel: chemistry and catalysis*. Catalysis Today, 98(1-2), 3–18. doi:10.1016/j.cattod.2004.07.048
60. Fujikawa, T., Kimura, H., Kiriya, K., & Hagiwara, K. (2006). *Development of ultra-deep HDS catalyst for production of clean diesel fuels*. Catalysis Today, 111(3-4), 188–193. doi:10.1016/j.cattod.2005.10.024
61. Klimov, O. V., Pashigreva, A. V., Fedotov, M. A., Kochubey, D. I., Chesalov, Y. A., Bukhtiyarova, G. A., & Noskov, A. S. (2010). *Co–Mo catalysts for ultra-deep HDS of diesel fuels prepared via synthesis of bimetallic surface compounds*. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 322(1-2), 80–89. doi:10.1016/j.molcata.2010.02.020
62. Sharma, M., Sharma P. and Kim, J.N. (2013) *Solvent extraction of aromatic components from petroleum derived fuels: a perspective review*. RSC Adv., 3: 10103–10126.

63. Kumar, S., Srivastava, V. C., & Nanoti, S. M. (2017). *Extractive Desulfurization of Gas Oils: A Perspective Review for Use in Petroleum Refineries*. *Separation & Purification Reviews*, 46(4), 319–347. doi:10.1080/15422119.2017.1288633
64. Abro, R., Abdeltawab, A. A., Al-Deyab, S. S., Yu, G., Qazi, A. B., Gao, S., & Chen, X. (2014). *A review of extractive desulfurization of fuel oils using ionic liquids*. *RSC Adv.*, 4(67), 35302–35317. doi:10.1039/c4ra03478c
65. A. Bosmann, L. Datsevich, A. Jess, A. Lauter, C. Schmitz and P. Wasserscheid, *Chemical Communications*, 2001, 2494–2495.
66. Rodríguez-Cabo, B., Rodríguez, H., Rodil, E., Arce, A., & Soto, A. (2014). *Extractive and oxidative-extractive desulfurization of fuels with ionic liquids*. *Fuel*, 117, 882–889. doi:10.1016/j.fuel.2013.10.012
67. Asumana, C., Haque, M. R., Yu, L., Wu, X., Chen, X., & Yu, G. (2013). *Desulfurization of Real Fuel Oils by Extraction with Ionic Liquids*. *Separation Science and Technology*, 48(17), 2582–2588. doi:10.1080/01496395.2013.804559
68. N. Palaić, a K. Sertić-Bionda, a,* D. Margeta, a and Š. Podolski (2015). *Oxidative Desulphurization of Diesel Fuels*. *Chemical and Biochemical Engineering, Q.*, 29 (3) 323–327
69. Ania, C. O., Parra, J. B., Arenillas, A., Rubiera, F., Bandosz, T. J., & Pis, J. J. (2007). *On the mechanism of reactive adsorption of dibenzothiophene on organic waste derived carbons*. *Applied Surface Science*, 253(13), 5899–5903. doi:10.1016/j.apsusc.2006.12.065
70. SANO, Y., SUGAHARA, K., CHOI, K., KORAI, Y., & MOCHIDA, I. (2005). *Two-step adsorption process for deep desulfurization of diesel oil*. *Fuel*, 84(7-8), 903–910. doi:10.1016/j.fuel.2004.11.019
71. Larrubia, M. A., Gutiérrez-Alejandre, A., Ramírez, J., & Busca, G. (2002). *A FT-IR study of the adsorption of indole, carbazole, benzothiophene, dibenzothiophene and 4,6-dibenzothiophene over solid adsorbents and catalysts*. *Applied Catalysis A: General*, 224(1-2), 167–178. doi:10.1016/s0926-860x(01)00769-4
72. Prasoulas, G.; Dimos, K.; Glekas, P.; Kalantzi, S.; Sarris, S.; Templis, C.; Vavitsas, K.; Hatzinikolaou, D.G.; Papayannakos, N.; Kekos, D.; Mamma, D. *Biodesulfurization of Dibenzothiophene and Its Alkylated Derivatives in a Two-Phase Bubble Column Bioreactor by Resting Cells of Rhodococcus erythropolis IGTS8*. *Processes* 2021, 9, 2064. <https://doi.org/10.3390/pr9112064>
73. Mohebali, G., & Ball, A. S. (2016). *Biodesulfurization of diesel fuels – Past, present and future perspectives*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 110, 163–180. doi:10.1016/j.ibiod.2016.03.011

74. Wang, S., & Notteboom, T. (2014). *The Adoption of Liquefied Natural Gas as a Ship Fuel: A Systematic Review of Perspectives and Challenges*. *Transport Reviews*, 34(6), 749–774. doi:10.1080/01441647.2014.981884
75. Meike Baumgart and Jon Halvard Bolstad Olsen. *LNG-fueled vessels in the Norwegian short-sea market – a cost-effective response to environmental regulation*. NORGES HANDELSHØYSKOLE, 2010.
76. Wärtsilä, 2015. *Wärtsilä solutions for marine and oil and gas markets*.
77. Fun-sang Cepeda, M. A., Pereira, N. N., Kahn, S., & Caprace, J.-D. (2019). *A review of the use of LNG versus HFO in maritime industry*. *Marine Systems & Ocean Technology*. doi:10.1007/s40868-019-00059-y
78. Koumentakos, A.G. *Developments in Electric and Green Marine Ships*. *Appl. Syst. Innov.* 2019, 2, 34. <https://doi.org/10.3390/asi2040034>
79. Lucia, U. (2014). *Overview on fuel cells*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 164–169. doi:10.1016/j.rser.2013.09.025
80. de-Troya, J. J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C., & Carral, L. (2016). *Analysing the possibilities of using fuel cells in ships*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2853–2866. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.11.14
81. Kass, Michael D., Abdullah, Zia, Bidy, Mary J., Drennan, Corinne, Haq, Zia, Hawkins, Troy, Jones, Susanne, Holliday, Jonathan, Longman, Douglas E., Menter, Seth, Newes, Emily, Theiss, Timothy J., Thompson, Tom, and Wang, Michael. *Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping*. United States: N. p., 2018. Web. doi:10.2172/1490575.
82. Amin A. *Review of diesel production from renewable resources: Catalysis, process kinetics and technologies*. *Ain Shams Eng J* 2019;10(4):821–39. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.001>.
83. Chu Van, T., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z., & Brown, R. J. (2019). *Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 70, 123–134. doi:10.1016/j.trd.2019.04.001
84. <https://tnmservices.com/imos-2020-sulphur-bunker-cap/>, (accessed 1/2/2023)
85. <https://www.lr.org/en/insights/articles/imo-ghg-strategy-what-does-it-mean/>, (accessed 1/2/2023)
86. <https://hawthornlogistics.ie/what-is-the-imo-2020-regulation/>, (accessed 1/2/2023)
87. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Wet_scrubber, (accessed 1/2/2023)

88. Fan, L., Gu, B., & Luo, M. (2020). *A cost-benefit analysis of fuel-switching vs. hybrid scrubber installation: A container route through the Chinese SECA case*. *Transport Policy*. doi:10.1016/j.tranpol.2020.09.008
89. <https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/IMO%20GHG%20strategy%20rapid%20analysis%20vf.pdf>, (accessed 10/2/2023)
90. <https://www.argusmedia.com/en/blog/2021/march/12/decarbonisation-in-the-bunker-market>, (accessed 10/2/2023)