



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Ποντοπόρος ναυτιλία: Ναυτιλιακά καύσιμα,
συστήματα επεξεργασίας καυσαερίων και
περιβαλλοντικοί στόχοι»*

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Μπαριτάκη Καλλιόπης

Επιβλέπων

Καρώνης Δημήτριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

«Au milieu de l'hiver, j'apprenais enfin
qu'il y avait en moi un été invincible»
Albert Camus

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του ΕΜΠ «Παραγωγή και διαχείριση ενέργειας». Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην υλοποίηση της εργασίας μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Ε.Μ.Π., κύριο Δημήτριο Καρόνη για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ολοκλήρωση του. Η επιστημονική υποστήριξη, καθώς και οι συμβουλές του, κατά τη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας, συνέβαλαν ιδιαίτερα στην κατανόηση και την πληρέστερη προσέγγιση του θέματος.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ευάγγελο Μπουτσιάνη, επικεφαλής του τμήματος Ενεργειακής Απόδοσης της ναυτιλιακής εταιρείας στην οποία εργάζομαι για τις συζητήσεις που πραγματοποιήσαμε αναφορικά με ενεργειακά ζητήματα του ναυτιλιακού κλάδου. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Μαρία Ελένη Κάραλη, performance engineer του τμήματος Ενεργειακής Απόδοσης για την συλλογή των δεδομένων που παρουσιάζονται στην εργασία, καθώς και για το πληροφοριακό υλικό που μου προσέφερε αναφορικά με τον τρόπο συμμόρφωσης των πλοίων με τους νέους περιβαλλοντικούς περιορισμούς.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Κάτια και Νίκο, την αδελφή μου, Γεωργία και τους φίλους μου για την απεριόριστη υπομονή τους και υποστήριξη στο χρονικό διάστημα συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και της ακαδημαϊκής μου φοίτησης στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

Καλλιόπη Μπαριτάκη,
Αθήνα 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των ναυτιλιακών καυσίμων, των συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων που εγκαθίστανται εν πλω, καθώς και των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν τεθεί.

Η πρόωση των πλοίων πραγματοποιείται χάρη στη λειτουργία δίχρονων κινητήρων, στους οποίους προστίθενται βαριά, υπολειμματικά καύσιμα (HFO) ή ελαφριά αποστάγματα του αργού πετρελαίου (MGO - MDO). Εναλλακτικές προτάσεις που αναπτύσσονται σταδιακά αποτελούν το υγροποιημένο φυσικό αέριο, η μεθανόλη, το υδρογόνο, η αμμωνία και τα βιοκαύσιμα. Μία σημαντική ιδιότητα των καυσίμων είναι η περιεκτικότητά τους σε θείο, που κυμαίνεται από 0.05 – 10% κατά βάρος. Η χαμηλή συγκέντρωση επιδιώκεται για περιβαλλοντικούς και λειτουργικούς σκοπούς, καθώς και για λόγους ασφαλείας. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αποθείωσης του πετρελαίου. Η κατανάλωση των καυσίμων επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους. Ο ανεφοδιασμός των πλοίων με αυτά, αποτελεί το υψηλότερο κόστος ενός ταξιδιού, προσεγγίζοντας το 54% των συνολικών εξόδων λειτουργίας τους. Κομβικά λιμάνια για πετρέλευση θεωρούνται η Σιγκαπούρη, η Φουτζέιρα και το Ρότερνταμ.

Ταυτόχρονα, η ναυτιλία συνιστά έναν ιδιαίτερα ρυπογόνο παράγοντα εξαιτίας των εκπομπών καυσαερίων. Ως εκ τούτου, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας έχει θέσει διάφορους περιορισμούς, με πιο πρόσφατο τον IMO 2020, που στοχεύει στον περιορισμό των εκπεμπόμενων οξειδίων του θείου. Η εναρμόνιση της λειτουργίας των πλοίων μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση καυσίμων μειωμένης περιεκτικότητας σε θείο ή με την εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού των καυσαερίων (scrubbers) σε συνδυασμό με HFO ή με την αξιοποίηση του LNG ως καύσιμο. Τα scrubbers διακρίνονται σε τρεις τύπους, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους: ανοιχτού κύκλου (open loop system), κλειστού κύκλου (closed loop system) και υβριδικά (hybrid system). Θεωρούνται αποτελεσματικά στη μείωση των αέριων ρύπων, επιτρέποντας την χρήση HFO. Ωστόσο, υπάρχουν προβληματισμοί αναφορικά με τη μόλυνση που μπορεί να προκαλέσει στο θαλάσσιο περιβάλλον η απόρριψη των υγρών αποβλήτων τους.

Από τα δεδομένα που λήφθηκαν από ναυτιλιακή εταιρεία, προκύπτει ότι το καύσιμο IFO RMG 380, περιεκτικότητας σε θείο 3.5% αγοράστηκε περισσότερο το διάστημα 2002-2016. Ωστόσο, παρατηρείται σταδιακή άνοδος της ζήτησης καυσίμων συγκέντρωσης 0.1% σε θείο. Οι περισσότερες αγορές πραγματοποιήθηκαν στο Νοβοροσίσκ, ενώ ακολουθούν η Σιγκαπούρη, το Αλτζεσίρας, η Φουτζέιρα και ο Πειραιάς. Ο ανεφοδιασμός των φορτηγών πλοίων και των υγραεριοφόρων έγινε κυρίως σε ασιατικές χώρες, ενώ των δεξαμενόπλοιων στην Ρωσία και την Ευρώπη. Η πετρέλευση έλαβε χώρα σε ενδιάμεσους σταθμούς των διαδρομών σε ποσοστό 68%, ενδεχομένως για την επίτευξη χαμηλού κόστους. Όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμων

θεωρείται πολυπαραγοντική, μιας και εξαρτάται από τον αριθμό των πλεύσιμων ημερών, το μέγεθος του σκάφους και την κατάσταση πλεύσης. Η ταχύτητα πλεύσης, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10.50 – 11.20 κόμβων όταν το πλοίο δεν φέρει φορτίο και 11.20 – 12.13 κόμβων όταν είναι φορτωμένο. Τα μηχανήματα που καταναλώνουν τη μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμων είναι η κύρια μηχανή πρόωσης και η γεννήτρια diesel, ενώ εξαιρετικά λιγότερη χρειάζεται ο ατμολέβητας. Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά τη λειτουργία των scrubbers αυξάνονται οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, οδηγώντας μέχρι και σε αύξηση 4% των καυσίμων.

ABSTRACT

The main purpose of this diploma thesis is the presentation of the marine fuels, the scrubber systems that are installed on board and the environmental goals that have been set.

The ships' propulsion is driven by two – stroke engines to which heavy fuel oils (HFO) or light crude oil distillates (MGO - MDO) are added. Alternative choices as LNG, methanol, hydrogen, ammonia and biofuels are being developed, gradually. An important fuel's property is their sulphur content, ranging from 0.05 to 10% by weight. A low concentration is aimed for environmental and operation purposes, as well as safety reasons. Therefore, various methods of crude oil's desulphurisation have been developed. Fuel's consumption is influenced by many parameters. The ship's refuelling is the highest cost of a voyage, representing close to 54% of their total operating costs. Singapore, Fujairah and Rotterdam are considered to be the key ports for bunkering.

At the meantime, shipping industry is a highly polluting factor due to the exhaust emissions. As a result, the International Maritime Organization has set various restrictions, the most recent being IMO 2020, which aims to limit the vessel's emission of sulphur oxides. The compliance of ship's operation can be achieved by using fuels of reduced sulphur content or by installing scrubber systems in combination with HFO or by using LNG as a marine fuel.

Scrubber systems can be classified into three types, depending on their operating mode: open loop, closed loop and hybrid system. They are considered to be effective in reducing the air pollutants, allowing the use of HFO. However, there are concerns about the pollution that their waste water discharge can cause to the marine environment.

Data obtained from a shipping company shows that IFO RMG 380 with a sulphur content of 3.5% was the most purchased fuel between 2002 – 2016. However, there is a gradual demand increase for fuel of 0.1% sulphur content. Most purchases were made in Novorossiysk, followed by Singapore, Algeciras, Fujairah and Piraeus. Bunkering process of dry vessels and LNG – LPG carriers took place in Asian countries mainly, whereas tankers' refuelling was in Russia and Europe. Fuel consumption is considered to be multi-factorial, as it depends on the number of the sailing days, vessel's size and sailing condition. The vessel's speed ranges between 10.50 – 11.20 knots in ballast status and 11.20 – 12.13 knots in laden status. The main engine and the diesel generator consume the largest amount of marine fuels, whereas boiler consumes considerably less. It is worth mentioning that during the scrubber's operation, the electricity requirements increase, leading even to a 4% increase in fuel consumption.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	11
1.1 Ναυτιλία – Τύποι πλοίων.....	11
1.2 Ναυτιλιακά Καύσιμα	14
1.2.1 Ναυτικοί Κινητήρες.....	14
1.2.2 Είδη Ναυτιλιακών Καυσίμων	18
1.2.3 Περιεκτικότητα θείου στα καύσιμα	25
1.2.4 Αποθείωση πετρελαίου	25
1.2.5 Εναλλακτικές Προτάσεις για Ναυτιλιακά Καύσιμα	28
1.2.6 Κατανάλωση καυσίμων.....	37
1.2.7 Ανεφοδιασμός Ναυτιλιακών Καυσίμων.....	38
1.2.8 Εξέλιξη τιμών καυσίμων	39
2.1 Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί.....	42
2.1.1. Περιβαλλοντικός Αντίκτυπος της Ναυσιπλοΐας.....	43
2.1.2. Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας – IMO.....	45
2.1.3 Περιοχές Ελεγχόμενων Εκπομπών Αερίων – ECA	46
2.1.4 IMO 2020	50
3.1 Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων – Scrubbers	52
3.1.1 Εξέλιξη των συστημάτων υγρού και ξηρού καθαρισμού καυσαερίων.....	52
3.1.2 Είδη και λειτουργία συστημάτων υγρού καθαρισμού.....	54
3.1.3 Βασικά στοιχεία των συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων	58
3.1.4 Προβληματισμοί σχετικά με την χρήση scrubbers	59
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	62
1.1 Τάσεις στην αγορά καυσίμων	62
1.2 Εκτελούμενα δρομολόγια με βάση το είδος των πλοίων.....	70
1.3 Κατανάλωση καυσίμων.....	72
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	78
1.1 Τάσεις στην αγορά καυσίμων	78
1.2 Κατανάλωση καυσίμων.....	81
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ	84
1.1 Προβλήματα από την χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.....	84
1.2 Εναλλακτικοί τρόποι πρόωσης των πλοίων.....	85
1.3 Χρησιμότητα περιοχών ECA	87

1.4 Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Πλοίων (ΕΕΧΙ).....	88
1.5 Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII).....	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	89

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Ναυτιλία – Τύποι πλοίων

Η ναυτιλία συνίσταται στη **μεταφορά ανθρώπων και αγαθών** διαμέσου της θάλασσας και αποτελεί μία από τις αρχαιότερες μορφές οικονομικής δραστηριότητας. Αναλυτικότερα, εκτιμάται ότι οι πρώτες μορφές θαλάσσιου εμπορίου, μικρής κλίμακας, εμφανίστηκαν περίπου 5000 χρόνια πριν (Rodrigue, 2020). Η εξέλιξη αυτή προέκυψε όταν οι άνθρωποι συνειδητοποίησαν ότι η μεταφορά εμπορευμάτων μέσω της θάλασσας ήταν περισσότερο **επικερδής** λόγω του μεγάλου όγκου που μπορούσε να αποσταλεί. Στην σύγχρονη εποχή εκτιμάται ότι περισσότερο από το **80% του παγκόσμιου εμπορίου** διακινείται μέσω της ναυτιλίας (UNCTAD, 2021).

Ο ναυτιλιακός κλάδος είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητος καθώς επηρεάζεται από την παγκόσμια οικονομία, τις κοινωνικοπολιτικές συνθήκες, τις τάσεις στην αγορά αγαθών και το κόστος μεταφοράς (Sun, Liu, Wang, & Li, 2020). Οι τρεις βασικοί τύποι εμπορευμάτων που διακινούνται είναι **σιτηρά, μέταλλα και ενεργειακοί πόροι**. Η αποστολή τους πραγματοποιείται με διαφορετικούς τύπους πλοίων, ώστε να εξασφαλιστεί η επιτυχής μεταφορά τους, καθώς και η εύκολη προσέγγιση των μέσων στα λιμάνια φόρτωσης και εκφόρτωσης. Ειδικότερα, τα πλοία μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος του εμπορεύματος που φέρουν - **φορτηγά ξηρού φορτίου (dry cargo vessels)** ή **φορτηγά υγρού φορτίου (liquid cargo vessels)** (Τριπολίτης & Τριάντης). Κάθε ομάδα περιλαμβάνει διάφορες υποκατηγορίες, όπως παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω και στην εικόνα που ακολουθεί:

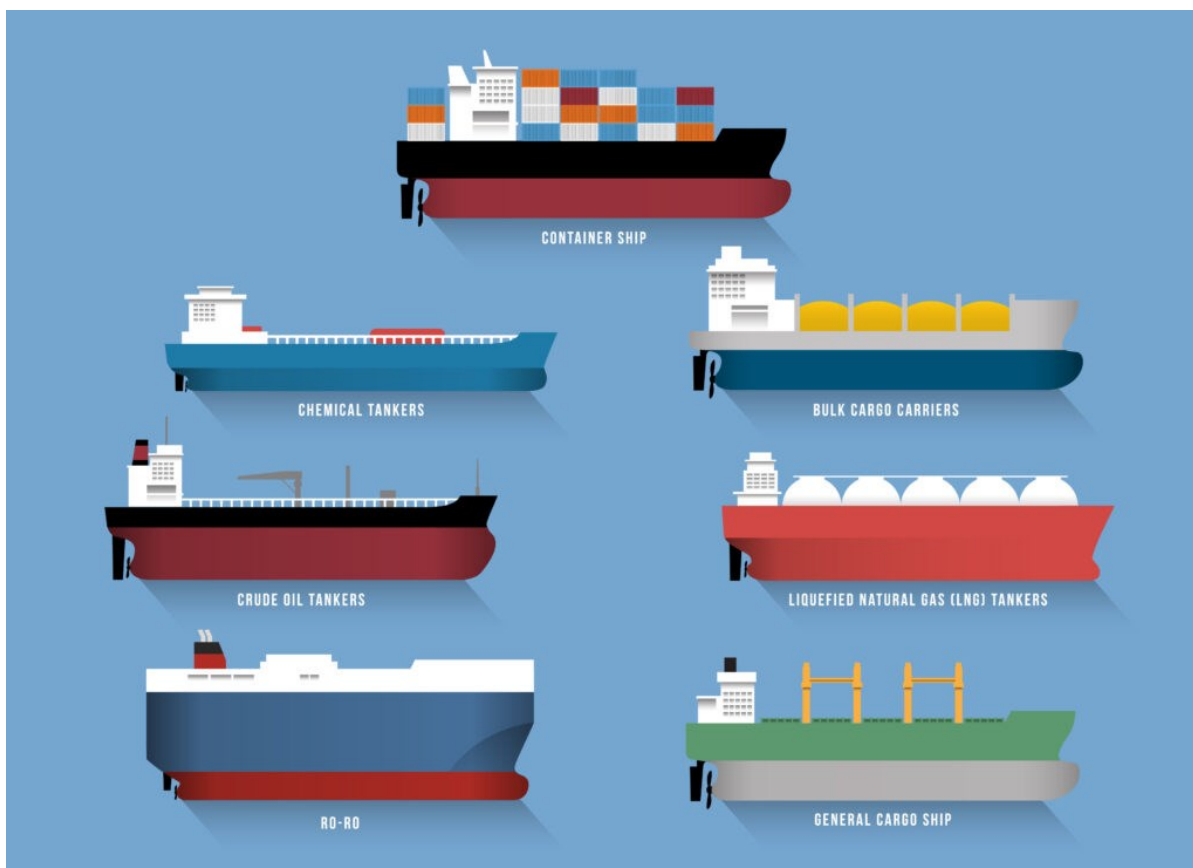
- **Φορτηγά ξηρού φορτίου (Dry cargo vessels):**
 - **Πλοία γενικών φορτίων (General cargo ships):** Τα πλοία αυτά είναι ειδικά διαμορφωμένα ώστε να μεταφέρουν φορτία που έχουν συσκευασθεί σε σάκους, δέματα, κιβώτια, βαρέλια, δοχεία κτλ. Εκτός αυτών, έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία και στη μεταφορά χύμα φορτίων, όπως σιτηρά, λιπάσματα, ζάχαρη και κάρβουνο.
 - **Πλοία ομοειδών φορτίων (Bulk carriers):** Τα συγκεκριμένα πλοία έχουν σχεδιασθεί για τη μεταφορά χύδην φορτίων, όπως σιτηρά, σιδηρομεταλλεύματα και τσιμέντο. Θεωρείται ότι αποτελούν το 15-17% του στόλου, παγκοσμίως και το μέγεθος τους ποικίλει ανάλογα με τον όγκο του εμπορεύματος που διακινούν.
 - **Εμπορευματοκιβωτιοφόρα (Container ships):** Τα πλοία αυτού του τύπου έχουν ναυπηγηθεί ώστε να δέχονται ένα μεγάλο αριθμό εμπορευματοκιβωτίων, γενικού φορτίου. Η κατασκευή τους αποτέλεσε μια επανάσταση στον χώρο των θαλάσσιων

μεταφορών, καθώς παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια και προστασία στα εμπορεύματα που διακινούνται, ιδιαίτερα αν παρεμβάλλονται πολλοί σταθμοί μέχρι τον τελικό προορισμό πχ ξηρά, θάλασσα, ποτάμι.

- **Πλοία μεταφοράς οχημάτων (Ro-Ro carriers):** Τα πλοία αυτά είναι κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να φορτώνουν και να μεταφέρουν οχήματα, εντός των οποίων αποθηκεύονται διάφορα εμπορεύματα. Ουσιαστικά, πρόκειται για μια παραλλαγή των εμπορευματοκιβωτιφόρων, με τη διαφορά ότι τα εμπορεύματα αποθηκεύονται σε μεγάλα τροχοφόρα οχήματα.

- **Φορητά υγρού φορτίου (liquid cargo vessels):**

- **Δεξαμενόπλοια – Πετρελαιοφόρα (Crude oil tankers):** Πρόκειται για πλοία που μεταφέρουν υγρά χύμα φορτία και κατά κύριο λόγο ακατέργαστο, υγρό πετρέλαιο από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες προς τα διυλιστήρια.
- **Δεξαμενόπλοια χημικών προϊόντων (Chemical tankers):** Τα πλοία αυτά είναι μια εξελιγμένη μορφή των κοινών δεξαμενόπλοιων, ειδικά κατασκευασμένων να διακινούν μία μεγάλη ποικιλία χημικών προϊόντων.
- **Υγραεριοφόρα (LNG - LPG):** Τα συγκεκριμένα πλοία είναι δεξαμενόπλοια που μεταφέρουν αέρια σε υγροποιημένη μορφή. Οι δύο βασικοί τύποι είναι τα πλοία LNG και LPG, όπου τα πρώτα μεταφέρουν φυσικό αέριο σε υγροποιημένη μορφή, ενώ τα δεύτερα μεταφέρουν υγροποιημένα αέρια πετρελαίου, όπως προπάνιο και βουτάνιο.



Εικόνα 1: Διάφοροι τύποι πλοίων (Rodrigue, 2020)

Εκτός των κατηγοριών που προαναφέρθηκαν, τα πλοία διακρίνονται σε επιμέρους ομάδες με βάση το **νεκρό βάρος τους (deadweight tonnage)**. Συγκεκριμένα, το νεκρό βάρος είναι μία μονάδα μέτρησης που αντικατοπτρίζει το άθροισμα όλων των προστιθέμενων μεταβλητών βαρών που επιτρέπεται να μεταφέρει ένα καράβι (Ζυγομάλας, 2021). Μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει το βάρος του φορτίου, των καυσίμων, των προμηθειών και του πληρώματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ονόματα που χρησιμοποιούνται για το μέγεθος ενός πλοίου, σε ορισμένες περιπτώσεις, αποτελούν και μία ένδειξη για τα σημεία από τα οποία μπορεί να διέλθει.

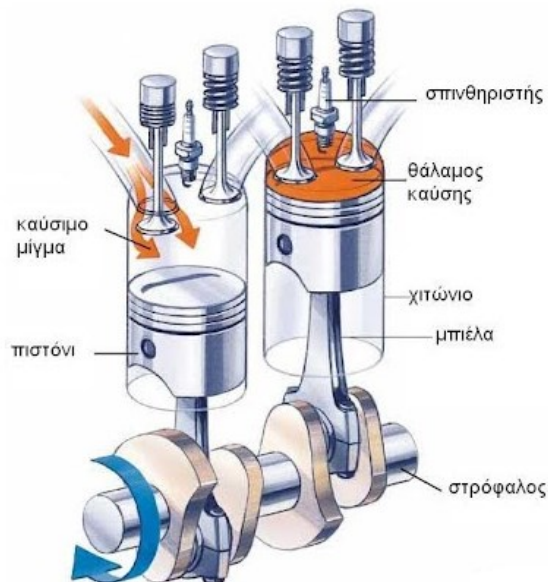
Πίνακας 1: Μεγέθη πλοίων

Δεξαμενόπλοια	MR1 (dwt)	MR2 (dwt)	Panamax (dwt)	Aframax (dwt)	Suezmax (dwt)	VLCC (dwt)
Κατώτερο Όριο	35,000	41,000	60,000	90,000	140,000	300,000
Ανώτερο Όριο	40,000	51,000	85,000	120,000	170,000	320,000
Πλοία ομοειδών φορτίων	Handysize (dwt)	Handymax (dwt)	Supramax (dwt)	Ultramax (dwt)	Kamsarmax (dwt)	Capesize (dwt)
Κατώτερο Όριο	10,000	40,000	50,000	60,000	82,000	120,000
Ανώτερο Όριο	39,999	49,999	59,000	65,000		180,000

1.2 Ναυτιλιακά Καύσιμα

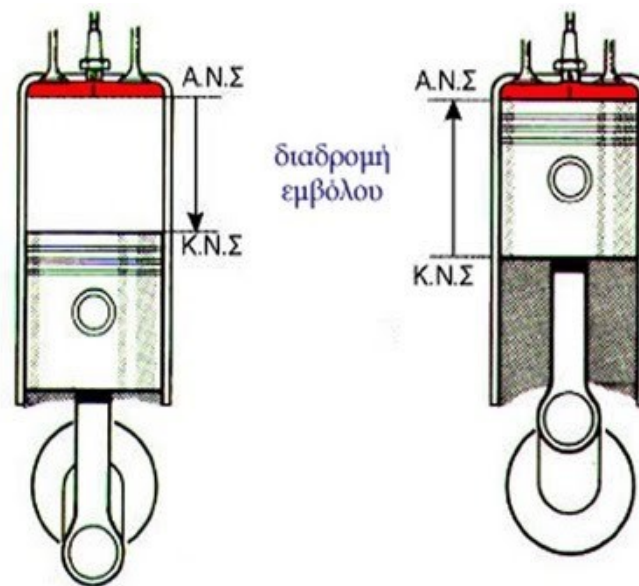
1.2.1 Ναυτικοί Κινητήρες

Τα σύγχρονα πλοία, ανεξαρτήτως τύπου, διαθέτουν **δίχρονους ή τετράχρονους** κινητήρες diesel για την πρόωση τους, καθώς και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτει ένα μεγάλο μέρος των αναγκών εν πλω (Demir & Citakoglu, 2022). Ο κινητήρας diesel αποτελεί μία **εμβολοφόρα μηχανή εσωτερικής καύσης** (Μ.Ε.Κ.), δηλαδή μια θερμική μηχανή όπου τα προϊόντα της καύσης του αέρα με το καύσιμο αποτελούν το εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή της μηχανικής ισχύος (Ρακόπουλος, 2013). Βασικό χαρακτηριστικό κάθε Μ.Ε.Κ. είναι ο κύλινδρος (θάλαμος καύσης), εντός του οποίου πραγματοποιούνται όλες οι διεργασίες.



Εικόνα 2: Βασικά εξαρτήματα μιας ΜΕΚ

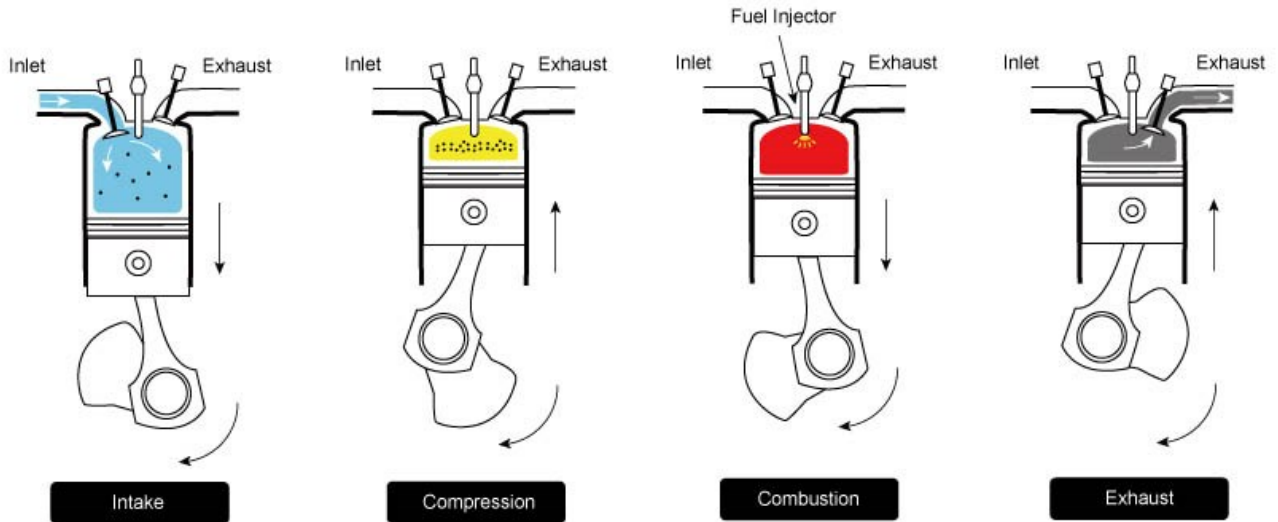
Το έμβολο (πιστόνι) μετακινείται κατά τη διάρκεια των διεργασιών μεταξύ δύο θέσεων, στις οποίες ακινητοποιείται στιγμιαία, στο άνω και κάτω νεκρό σημείο (ΑΝΣ - ΚΝΣ). Ως χρόνος λειτουργίας ορίζεται κάθε διαδρομή του εμβόλου από το ΑΝΣ προς ΚΝΣ ή αντιστρόφως (Γιακουμής, 2021). Με βάση αυτό πραγματοποιείται η διάκριση των κινητήρων σε τετράχρονους ή δίχρονους. Συγκεκριμένα, στους **τετράχρονους κινητήρες**, η ολοκλήρωση των διεργασιών εντός του θαλάμου καύσης πραγματοποιείται σε δύο περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου, δηλαδή τέσσερις διαδρομές του εμβόλου μεταξύ του άνω (ΑΝΣ) και του κάτω νεκρού σημείου (ΚΝΣ) (Cleveland, 2004). Αντιθέτως, στους **δίχρονους κινητήρες** υφίσταται μία μόνο περιστροφή της ατράκτου, δηλαδή δύο διαδρομές του εμβόλου.



Εικόνα 3: Αναπαράσταση του άνω και του κάτω νεκρού σημείου ενός θαλάμου καύσης

Οι **διεργασίες** που λαμβάνουν χώρα εντός μιας ΜΕΚ περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

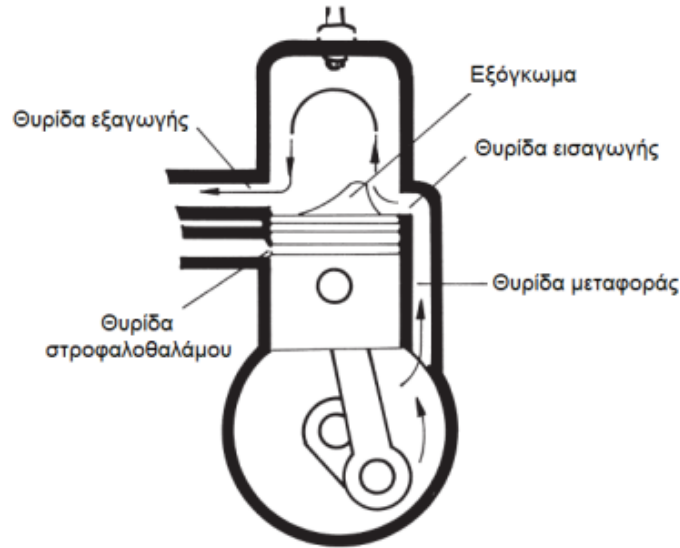
1. Η **εισαγωγή** της νέας γόμωσης, δηλαδή αέρα ή αερίου μίγματος, μέσω βαλβίδων ή θυρίδων.
2. Η **συμπίεση** της εγκλωβισμένης γόμωσης μέσω της ανοδικής κίνησης του εμβόλου, εφόσον έχει προηγηθεί η φραγή των βαλβίδων ή θυρίδων.
3. Η **εκτόνωση** του καιόμενου μίγματος λόγω της πρόσδοσης σε αυτό θερμότητας μέσω της καύσης. Το γεγονός αυτό αυξάνει σημαντικά την πίεση και τη θερμοκρασία με αποτέλεσμα την παραγωγή ωφέλιμου έργου στον κινητήρα.
4. Η **εξαγωγή** του καυσαερίου διαμέσου των βαλβίδων ή θυρίδων εξαγωγής προς το περιβάλλον.



Εικόνα 4: Διεργασίες εντός του θαλάμου καύσης MEK

Στην περίπτωση ενός **τετράχρονου κινητήρα**, εισάγεται στον θάλαμο καύσης η νέα γόμωση (αέρας ή μίγμα αέρα-ατμών καυσίμου) λόγω της υποπίεσης που δημιουργείται από την κίνηση του εμβόλου από το ANΣ προς το ΚΝΣ. Ακολουθεί η φραγή της βαλβίδας εισαγωγής και η συμπίεση της εισηγμένης γόμωσης λόγω της μετατόπισης του εμβόλου από το ΚΝΣ προς το ANΣ. Έπειτα, λαμβάνει χώρα η καύση του αερίου μίγματος με αποτέλεσμα την αποτόνωση του μίγματος και ως εκ τούτου τη μετακίνηση του εμβόλου από το ANΣ προς το ΚΝΣ. Τέλος, ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής και απελευθερώνονται τα καυσαέρια κατά την πορεία του πιστονίου από το ΚΝΣ προς το ANΣ.

Οι ίδιες διεργασίες εκτελούνται στο εσωτερικό των **δίχρονων κινητήρων**, με τη διαφορά ότι διαρκούν μία μόλις περιστροφή της στροφαλοφόρου ατράκτου, δηλαδή δύο διαδρομές του εμβόλου μεταξύ του ANΣ και του ΚΝΣ (Alturki, 2017). Ειδικότερα, κύριο χαρακτηριστικό των δίχρονων μηχανών είναι η ταυτόχρονη εισαγωγή του αερίου μίγματος και εξαγωγή των καυσαερίων. Αυτό επιτυγχάνεται χάρις την ιδιαίτερη διαμόρφωση του θαλάμου καύσης, όπως παρουσιάζεται ακολούθως:



Εικόνα 5: Θάλαμος καύσης δίχρονου κινητήρα (Γιακουμής, 2021)

Η κίνηση του εμβόλου προς το ΚΝΣ αποκαλύπτει πρώτα την θυρίδα εξαγωγής προκειμένου να απελευθερωθούν τα καυσαέρια και έπειτα την θυρίδα εισαγωγής της νέας γόμωσης. Αυτό διευκολύνει την εναλλαγή των αερίων εντός του κυλίνδρου, μιας και δεν υπάρχει ξεχωριστός χρόνος για αυτές τις διεργασίες (Γιακουμής, 2021).

Οι **κινητήρες diesel** αποτελούν κινητήρες έναυσης λόγω συμπίεσης. Αναλυτικότερα, μια μηχανή diesel χαρακτηρίζεται από την έννοια της αυτανάφλεξης του καυσίμου, σε αντίθεση με τις μηχανές Otto όπου το μίγμα αέρα-καύσιμου αναφλέγεται με τη βοήθεια σπινθηριστή (Ashok, 2021). Κατά την φάση της εισαγωγής σε μια μηχανή diesel, ο θάλαμος καύσης δέχεται μόνο αέρα, ο οποίος εγκλωβίζεται εντός του κυλίνδρου και στην συνέχεια συμπιέζεται. Ακολουθεί η έγχυση καυσίμου, το οποίο λόγω της αυξημένης πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν εντός του θαλάμου καύσης αυτανάφλεγεται. Με αυτόν τον τρόπο επέρχεται η εκτόνωση που οδηγεί στην παραγωγή του ωφέλιμου μηχανικού έργου. Η επιλογή του κινητήρα diesel στηρίζεται στο γεγονός ότι αποδίδει μεγαλύτερη ισχύ συγκριτικά με έναν κινητήρα Otto λόγω των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του (Suppes & Storvick, 2016). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι δίχρονοι κινητήρες diesel πρόωσης μεγάλων πλοίων που έχουν πετύχει τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης θερμικής μηχανής, 53% (Γιακουμής, 2021).

1.2.2 Είδη Ναυτιλιακών Καυσίμων

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως στους ναυτιλιακούς κινητήρες διακρίνονται σε **βαριά υπολειμματικά** (residual ή heavy fuel oil) και σε **ελαφριά αποστάγματα** του αργού πετρελαίου (marine gas oil – marine diesel oil) (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Αναλυτικότερα, τα **βαριά υπολειμματικά καύσιμα** (HFO) συλλέγονται από τη βάση της αποστακτικής στήλης, ως υπολείμματα της απόσταξης που πραγματοποιείται για τον διαχωρισμό του αργού πετρελαίου σε επιμέρους προϊόντα. Αποτελούνται από βαριά μόρια όπως υδρογονάνθρακες μακράς αλυσίδας, καθώς και αρωματικούς με έντονη διακλάδωση (Khan R. , 2011). Έχουν μαύρο χρώμα, υψηλό σημείο βρασμού μεταξύ των θερμοκρασιών 350°C και 500°C και αυξημένο ιξώδες, μεγαλύτερο από τα 10 cSt στους 80°C. Συνήθως, χρειάζεται να θερμανθούν προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη ροή στις δεξαμενές. Χαρακτηριστικό των βαρειών υπολειμματικών καυσίμων είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο καθώς και σε άλλες, επιβλαβείς για τους κινητήρες ουσίες, όπως το βανάδιο (Jansohn, 2013). Το γεγονός αυτό οδηγεί συχνά στην ανάμιξη των HFO με ελαφρύτερα προϊόντα, σε καθορισμένες αναλογίες για να επιτευχθούν οι επιθυμητές προδιαγραφές. Τα προϊόντα αυτά χαρακτηρίζονται από το αρκτικόλεξο **IFO – Intermediate Fuel Oil** και έναν αριθμό που αντικατοπτρίζει το ιξώδες του καυσίμου. Ο τύπος που χρησιμοποιείται περισσότερο στην ναυτιλία είναι το IFO 180 και το IFO 380 με τιμή ιξώδους 180 και 380 cSt στους 50°C, αντίστοιχα (Stout & Wang, 2016). Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε θείο, υπάρχει μια επιμέρους κατηγοριοποίηση των καυσίμων, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί (Lee, et al., 2022):

Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση καυσίμων με βάση την περιεκτικότητα τους σε θείο

Τύπος ναυτιλιακού καυσίμου	Μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο (%)
HSFO (High Sulfur Fuel Oil)	3.5
LSFO (Low Sulfur Fuel Oil)	1.0
VLSFO (Very-Low Sulfur Fuel Oil)	0.5
ULSFO (Ultra-Low Sulfur Fuel Oil)	0.1

Αξίζει να αναφερθεί ότι η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο επιδιώκεται για περιβαλλοντικούς σκοπούς (μείωση των εκπομπών διοξειδίου του θείου), λειτουργικούς (δηλητηρίαση καταλυτών από θειούχες ενώσεις) και λόγους ασφαλείας (δηλητηρίαση από υδρόθειο) (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014) που θα αναλυθούν παρακάτω.



Εικόνα 6: Βαριά υπολειμματικά καύσιμα HFO

Ακολουθούν τα **ελαφριά αποστάγματα** του αργού πετρελαίου που χρησιμοποιούνται ως καύσιμα στον ναυτιλιακό κλάδο (MDO - MGO). Ειδικότερα, το **MDO – Marine Diesel Oil** αποτελεί έναν συνδυασμό αποσταγμάτων και βαρειών υπολειμματικών καυσίμων (Stout & Wang, 2016). Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες – ελαφρύ και βαρύ – με βάση την περιεκτικότητα του σε βαριά κλάσματα (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Το MDO light είναι καθαρό κλάσμα με εξαιρετικά μικρό υπόσθημα και εξανθράκωμα, σε αντίθεση με το MDO heavy που παράγεται από ανάμιξη 80-90% MDO light με βαριά υπολειμματικά καύσιμα. Το ιξώδες του MDO heavy κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2–11 cSt σε θερμοκρασία 40°C και το χρώμα του από ανοιχτό καφέ μέχρι μαύρο, ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε HFO (Marine distillate fuels ISO 8217:2017, 2017). Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε θείο, η τιμή διαμορφώνεται γύρω στο 1.5%.

Παράλληλα, χρησιμοποιείται και το **MGO – Marine Gas Oil**, που αν και εντάσσεται στην κατηγορία των καυσίμων diesel, είναι υψηλότερης ποιότητας συγκριτικά με το MDO. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη βαριών υπολειμματικών καυσίμων με αποτέλεσμα το ναυτιλιακό gasoil να παρουσιάζει ανάλογες φυσικοχημικές ιδιότητες με το diesel (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Η τιμή ιξώδους του MGO κυμαίνεται από 4-10 cSt σε θερμοκρασία 40°C και η περιεκτικότητα του σε θείο είναι μικρότερη από 0.1% m/m (Allal, Mansouri, Youssfi, & Qbadou, 2019). Αποτελεί ένα διάφανο υγρό ή διατηρεί μια απόχρωση ανοιχτού καφέ ή κίτρινου. Από πλευράς κόστους, το MGO είναι το ακριβότερο ναυτιλιακό καύσιμο αυτή την στιγμή.



Εικόνα 7: Marine Diesel Oil – MDO



Εικόνα 8: Marine Gas Oil – MGO

Ο παγκόσμιος χαρακτήρας της ναυτιλίας καθιστά απαραίτητη την τυποποίηση των καυσίμων με ένα διεθνές σύστημα προκειμένου να καθορίζονται οι επιθυμητές ιδιότητες. Ειδικότερα, οι προδιαγραφές των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στους ναυτικούς κινητήρες διαμορφώνονται από το διεθνή οργανισμό τυποποίησης ISO και πιο συγκεκριμένα από το πρότυπο **ISO 8217** (ISO 8217: 2017 Petroleum products - Fuels (Class F) - Specifications of marine fuels, 2017). Το πρότυπο περιλαμβάνει διάφορες κατηγορίες καυσίμων οι οποίες χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο συνδυασμό γραμμμάτων και αριθμών. Παρακάτω αναφέρονται οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες:

- Το **γράμμα F** χαρακτηρίζει τα καύσιμα τα οποία περιέχουν σε κάποιο ποσοστό μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (FAME). Τα συγκεκριμένα μόρια προέρχονται από μετεστεροποίηση ενός λιπαρού οξέος και μίας αλκοόλης. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι χρησιμοποιούνται συχνά ως συστατικό ανάμειξης στο καύσιμο diesel για την παραγωγή biodiesel.

- Το **γράμμα D** αφορά την αγγλική λέξη **distillate** και σχετίζεται με τα κλάσματα που έχουν προέλθει από την απόσταξη του αργού πετρελαίου. Το D συνοδεύεται συνήθως από έναν αριθμό που υποδεικνύει τις ιδιότητες του καυσίμου, όπως η περιεκτικότητα σε θείο και ο αριθμός κετανίου.
- Το **γράμμα R** χαρακτηρίζει τα υπολειμματικά καύσιμα και προέρχεται από την αγγλική λέξη **residual**.

Εκτός των παραπάνω, υπάρχουν και πρόσθετα γράμματα που συνθέτουν την τελική ονομασία των καυσίμων:

- M από τη λέξη marine
- X, A, B, C ... K, με βάση τις προδιαγραφές που έχει ορίσει το πρότυπο ISO

Αξίζει να σημειωθεί ότι το Marine Gas Oil αποτελεί το **DMX**, το Marine Diesel Oil περιλαμβάνει τα **DMA, DMB, DMZ**, ενώ στην κατηγορία των Heavy Fuel Oils εντάσσονται τα **RMA, RMB, RME, RMG και RMK**.

Characteristic	Unit	Limit	Category ISO-F-								Test method(s) and references
			DMX	DMA	DFA	DMZ	DFZ	DMB	DFB		
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s ^a	Max	5,500	6,000	6,000	6,000	11,00	ISO 3104			
		Min	1,400	2,000	3,000	2,000					
Density at 15 °C	kg/m ³	Max	–	890,0	890,0	900,0	ISO 3675 or ISO 12185; see 6.1				
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; see 6.3				
Flash point	°C	Min	43,0	60,0	60,0	60,0	ISO 2719; see 6.4				
Hydrogen sulfide	mg/kg	Max	2,00	2,00	2,00	2,00	IP 570; see 6.5				
Acid number	mg KOH/g	Max	0,5	0,5	0,5	0,5	ASTM D664; see 6.6				
Total sediment by hot filtration	mass %	Max	–	–	–	0,10 ^c	ISO 10307-1; see 6.8				
Oxidation stability	g/m ³	Max	25	25	25	25 ^d	ISO 12205				
Fatty acid methyl ester (FAME) ^e	volume %	Max	–	–	7,0	–	7,0	–	7,0	ASTM D7963 or IP 579; see 6.10	
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 ^f	winter	°C	Max	–16	report	report	–	ISO 3015; see 6.11			
	summer	°C	Max	–16	–	–	–				
Cold filter plugging point ^f	winter	°C	Max	–	report	report	–	IP 309 or IP 612; see 6.11			
	summer	°C	Max	–	–	–	–				
Pour point (upper) ^f	winter	°C	Max	–	– 6	– 6	0	ISO 3016; see 6.11			
	summer	°C	Max	–	0	0	6				
Appearance			Clear and Bright ^g				^e	see 6.12			
Water	volume %	Max	–	–	–	0,30 ^e	ISO 3733				
Ash	mass %	Max	0,010	0,010	0,010	0,010	ISO 6245				
Lubricity, corrected wear scar diameter (WSD) at 60 °C ^h	µm	Max	520	520	520	520 ^d	ISO 12156-1				

a 1 mm²/s = 1 cSt.

b Notwithstanding the limits given, the purchaser shall define the maximum sulfur content in accordance with relevant statutory limitations. See Introduction.

c If the sample is not clear and bright, the total sediment by hot filtration and water tests shall be required, see 6.8 and 6.12.

d If the sample is not clear and bright, the test cannot be undertaken and therefore, compliance with this limit cannot be shown.

e See 5.1 and Annex A.

f Pour point cannot guarantee operability for all ships in all climates. The purchaser should confirm that the cold flow characteristics (pour point, cloud point, cold filter, plugging point) are suitable for the ship's design and intended voyage. See 6.11.

g If the sample is dyed and not transparent, then the water limit and test method as given in 6.12 shall apply.

h This requirement is applicable to fuels with a sulfur content below 500 mg/kg (0,050 mass %).

Εικόνα 9: Προδιαγραφές ναυτιλιακών καυσίμων - αποσταγμάτων σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8217:2017

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 ^a	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; see 6.1	
CCAI	-	Max	850	860	860	860	870				870			see 6.2	
Sulfur ^b	mass %	Max	Statutory requirements											ISO 8754 or ISO 14596 or ASTM D4294; see 6.3	
Flash point	°C	Min	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0				60,0			ISO 2719; see 6.4	
Hydrogen sulfide	mg/kg	Max	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				2,00			IP 570; see 6.5	
Acid number ^c	mg KOH/g	Max	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5				2,5			ASTM D664; see 6.6	
Total sediment – Aged	mass %	Max	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10				0,10			ISO 10307-2; see 6.9	
Carbon residue – Micro method	mass %	Max	2,50	10,00	14,00	15,00	18,00				20,00			ISO 10370	
Pour point (upper) ^d	winter	°C	Max	0	0	30	30	30				30			ISO 3016
	summer	°C	Max	6	6	30	30	30				30			
Water	volume %	Max	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50				0,50			ISO 3733	
Ash	mass %	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; see 6.14	
Sodium	mg/kg	Max	50	100	100	50	100				100			IP 501, IP 470; see 6.15	
Aluminium plus silicon	mg/kg	Max	25	40	40	50	60				60			IP 501, IP 470 or ISO 10478; see 6.16	
Used lubricating oil (ULO): – 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; see 6.17	

a 1 mm²/s = 1 cSt.

b The purchaser shall define the maximum sulfur content in accordance with relevant statutory limitations. See Introduction.

c See Annex E.

d Purchasers should confirm that this pour point is suitable for the ship's intended area of operation.

Εικόνα 10: Προδιαγραφές ναυτιλιακών, υπολειμματικών καυσίμων σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8217:2017

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία σχετικά με τον τύπο ναυτιλιακών καυσίμων που επιλέγονται παγκοσμίως, όπως δημοσιοποιήθηκαν το 2021 από τον οργανισμό **United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD, 2021)**:

Fuel type	Ships	GT	TEU	dwt	Ships %	GT %	TEU %	Dwt %	Ships % of known fuel type	GT % of known fuel type	TEU % of known fuel type	Dwt % of known fuel type
Very Low-Sulphur (VLS) Intermediate Fuel Oil (IFO)	36 188	993 715 259	18 384 210	1 534 083 046	36.26	69.08	70.97	72.11	47.12	72.26	71.29	74.54
VLS Marine Diesel Oil (MDO)	33 118	29 698 675	149 929	27 886 341	33.18	2.06	0.58	1.31	43.12	2.16	0.58	1.36
IFO 380*	3 635	283 299 533	6 949 482	437 386 040	3.64	19.69	26.83	20.56	4.73	20.60	26.95	21.25
VLS Marine Gasoil (MGO)	2 539	7 441 142	34 467	6 769 951	2.54	0.52	0.13	0.32	3.31	0.54	0.13	0.33
Ultra-Low Sulphur (ULS) MDO	381	697 587	7 000	661 627	0.38	0.05	0.03	0.03	0.50	0.05	0.03	0.03
LNG, VLS IFO	373	36 964 811	144 014	30 159 817	0.37	2.57	0.56	1.42	0.49	2.69	0.56	1.47
LNG, VLS MDO	168	10 814 060	12 703	8 190 743	0.17	0.75	0.05	0.39	0.22	0.79	0.05	0.40
IFO 180	166	7 351 589	75 955	9 536 173	0.17	0.51	0.29	0.45	0.22	0.53	0.29	0.46
ULS IFO	43	352 580	15 617	438 639	0.04	0.02	0.06	0.02	0.06	0.03	0.06	0.02
LNG, VLS MGO	37	424 846	10	430 662	0.04	0.03	0.00	0.02	0.05	0.03	0.00	0.02
LNG	32	459 380	260	139 039	0.03	0.03	0.00	0.01	0.04	0.03	0.00	0.01
MDO	22	652 797	1 629	188 652	0.02	0.05	0.01	0.01	0.03	0.05	0.01	0.01
ULS MGO	22	26 594		16 571	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
Biofuel	18	360 677	11 684	386 434	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02
MGO	12	880 222		122 003	0.01	0.06		0.01	0.02	0.06		0.01
Methanol, VLS IFO	11	336 377		552 044	0.01	0.02		0.03	0.01	0.02		0.03
Ethane, VLS IFO	7	292 595		264 750	0.01	0.02		0.01	0.01	0.02		0.01
Nuclear	6	144 573	1 324	50 079	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
LPG, VLS IFO	5	236 752		272 690	0.01	0.02		0.01	0.01	0.02		0.01
Biofuel, LNG	4	43 851		3 907	0.00	0.00		0.00	0.01	0.00		0.00
Compressed Natural Gas (CNG), VLS MDO	3	111 058		105 325	0.00	0.01		0.00	0.00	0.01		0.01
IFO 380, LNG	2	251 144		18 400	0.00	0.02		0.00	0.00	0.02		0.00
MDO, MGO	2	183 254		16 030	0.00	0.01		0.00	0.00	0.01		0.00
Biofuel, VLS MGO	2	6 810		9 876	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00
VLS IFO, Well Fuel	1	86 952		166 546	0.00	0.01		0.01	0.00	0.01		0.01
CNG, VLS MGO	1	30 742		31 473	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00
LNG, MDO	1	65 314	600	22 437	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
IFO 380*, MGO	1	149 215		19 189	0.00	0.01		0.00	0.00	0.01		0.00
Methanol	1	51 837		10 670	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00
Nuclear, VLS MDO	1	33 500		9 000	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00		0.00
Unknown fuel type	22 998	63 435 988	115 238	69 356 421	23.04	4.41	0.44	3.26	0.00	0.00	-	0.00
Grand Total	99 800	1 438 599 714	25 904 122	2 127 304 575	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
World total known fuel type	76 802	1 375 163 726	25 788 884	2 057 948 154								100.00

Εικόνα 11: Στατιστικά στοιχεία για τη συχνότητα επιλογής των διαφόρων τύπων ναυτιλιακών καυσίμων

1.2.3 Περιεκτικότητα θείου στα καύσιμα

Το αργό πετρέλαιο, εκτός από μεγάλη ποικιλία υδρογονανθράκων, περιέχει και ενώσεις άλλων στοιχείων, όπως θειούχες, αζωτούχες και οξυγονούχες. Περιλαμβάνει ακόμη ενώσεις μετάλλων σε ποσότητες ιχνών, παραδείγματος χάρη βαναδίου, σιδήρου και νικελίου. Τα περισσότερα από αυτά τα συστατικά είναι ανεπιθύμητα καθώς δημιουργούν προβλήματα στην επεξεργασία του ακατέργαστου πετρελαίου ή υποβαθμίζουν την ποιότητα των προϊόντων (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Η περιεκτικότητα του πετρελαίου σε **θείο** κυμαίνεται από **0.05 – 10%** κατά βάρος, αλλά συνήθως εντάσσεται στο εύρος 1-4% κατά βάρος. Όταν η συγκέντρωση του θείου είναι μικρότερη του 1% κατά βάρος, το αργό πετρέλαιο χαρακτηρίζεται ως **γλυκό (sweet)** και απαιτεί λιγότερο έντονη επεξεργασία συγκριτικά με εκείνο που διαθέτει μεγαλύτερα ποσοστά και ονομάζεται **όξινο (sour)** (Fahim, Alsahhaf, & Elkilani, 2010). Το θείο υπάρχει στο αργό πετρέλαιο σε διάφορες μορφές, κυρίως ως οργανοθειούχες ενώσεις. Οι ενώσεις αυτές αποτελούνται από θείο σε συνδυασμό με άνθρακα, υδρογόνο και άλλα στοιχεία. Συχνές μορφές είναι οι μερκαπτάνες, γνωστές ως θειόλες. Οι οργανικές αυτές ενώσεις χαρακτηρίζονται από την παρουσία της λειτουργικής ομάδας SH, δηλαδή ενός ατόμου θείου συνδεδεμένο με ένα άτομο υδρογόνου. Άλλες χαρακτηριστικές ομάδες είναι τα σουλφίδια, δηλαδή ενώσεις που ένα ανόργανο ανιόν του θείου. Η προέλευση των ενώσεων θείου στο πετρέλαιο δεν έχει προσδιοριστεί επαρκώς. Εικάζεται ότι κατά τον σχηματισμό του αργού πετρελαίου από υπολείμματα αρχαίων θαλάσσιων οργανισμών που θάφτηκαν στον πυθμένα του ωκεανού από στρώματα ιζημάτων, οι ενώσεις θείου που υπήρχαν στην οργανική ύλη έγιναν μέρος των υδρογονανθράκων που προέκυψαν (Mohammadi, Khanmohammadi Khorrami, Vatanparast, Karimi, & Sadrara, 2022). Εκτός αυτού, τα ιζήματα που συσσωρεύτηκαν στον βυθό ενδέχεται να περιείχαν ορυκτά και ενώσεις πλούσιες σε θείο που αργότερα ενσωματώθηκαν στο ακατέργαστο πετρέλαιο. Μάλιστα, η δράση βακτηρίων στα ιζήματα αυτά μπορεί να συνέβαλλε στον εμπλουτισμό του πετρελαίου σε υδρόθειο.

1.2.4 Αποθείωση πετρελαίου

Η **αποθείωση** του αργού πετρελαίου είναι μία αναγκαία διαδικασία που πραγματοποιείται στα διυλιστήρια και η οποία εντείνεται τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των περιβαλλοντικών περιορισμών που τίθενται σε ισχύ. Το ακατέργαστο πετρέλαιο που διαθέτει υψηλή περιεκτικότητα σε θείο είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό για τον εξοπλισμό των διυλιστηρίων και ενέχει υψηλό κίνδυνο πρόκλησης φθορών σε αγωγούς και δεξαμενές αποθήκευσης (Javadli & Klerk, 2012). Εκτός αυτού, θεωρείται υπεύθυνο για τη δηλητηρίαση των καταλυτών, οι οποίοι διαδραματίζουν κομβικό ρόλο σε διεργασίες διύλισης, όπως είναι η αναμόρφωση, ο πολυμερισμός, η πυρόλυση και η υδρογονοαποθείωση (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Παράλληλα, οι θειούχες ενώσεις προκαλούν δυσάρεστη οσμή τόσο στο πετρέλαιο όσο και στα προϊόντα του, υποβαθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ποιότητα τους. Μάλιστα, μεγάλο μέρος των ενώσεων αυτών καταλήγει στα

τελικά προϊόντα που εξάγονται από τα διυλιστήρια με αποτέλεσμα να απειλεί με διάβρωση τις κινητήριες μηχανές στις οποίες προστίθενται. Τέλος, η καύση του θείου στους κινητήρες οδηγεί στον σχηματισμό οξειδίων όπως το διοξείδιο (SO_2) και το τριοξείδιο του θείου (SO_3), τα οποία προκαλούν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την υγεία (Wang & Schrader, 2015).

Η κύρια μέθοδος επεξεργασίας του αργού πετρελαίου που εφαρμόζεται προκειμένου να μειωθεί η περιεκτικότητα του σε θείο είναι η **υδρογονοαποθείωση**. Σε ερευνητικό επίπεδο έχουν αναπτυχθεί διάφοροι πρόσθετοι τρόποι κατεργασίας όπως είναι η οξειδωτική αποθείωση (ODS), η αποθείωση με υπερήχους ή με προσρόφηση και η βιοαποθείωση. Η επιλογή του κατάλληλου τρόπου αποθείωσης εξαρτάται από παράγοντες όπως ο τύπος του ακατέργαστου πετρελαίου, η επιθυμητή συγκέντρωση που χρειάζεται να επιτευχθεί, οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί και το κόστος (Mirshafiee, et al., 2023). Παρακάτω θα καταγραφούν μερικές πληροφορίες για τον κάθε τύπο αποθείωσης.

Υδρογονοαποθείωση (HDS)

Η υδρογονοαποθείωση είναι μία διεργασία κατά την οποία τα προϊόντα του πετρελαίου αναμιγνύονται με υδρογόνο, το οποίο αντιδρά με τις ενώσεις θείου για να παραχθεί υδρόθειο H_2S (Jawaid, Ahmad, & Bhaskar Reddy, 2022). Πρόκειται για μία μέθοδο που πραγματοποιείται με τη βοήθεια καταλύτη, συνήθως κοβάλτιο και μολυβδένιο σε φορέα αλούμινα. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι στους 320 - 400°C και η πίεση γύρω στις 50 - 60 atm (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Τα προϊόντα της αντίδρασης οδηγούνται σε διαδοχικές στήλες κλασμάτωσης, όπου λαμβάνονται τα επιθυμητά αποθειωμένα προϊόντα.

Οξειδωτική αποθείωση (ODS)

Η συγκεκριμένη διεργασία περιλαμβάνει δύο στάδια, κατά τα οποία πραγματοποιείται οξείδωση και έπειτα εκχύλιση των θειούχων ενώσεων από το πετρέλαιο. Αρχικά, λαμβάνει χώρα η οξείδωση με την χρήση κατάλληλων οξειδωτικών μέσων με αποτέλεσμα τη μετατροπή των ενώσεων σε σουλφοξείδια και έπειτα σουλφόνες (Saha, Vedachalam, & Dalai, 2021). Στην συνέχεια, γίνεται η εκχύλιση τους με την χρήση κατάλληλου, πολικού διαλύτη και έτσι επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του θείου. Συγκριτικά με την υδρογονοαποθείωση θεωρείται ότι υπερτερεί καθώς οι διεργασίες πραγματοποιούνται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες – πιέσεις και αποφεύγεται η χρήση του υδρογόνου που έχει αυξημένο κόστος (Campos-Martin, Capel-Sanchez, Perez-Prasas, & Fierro, 2016).

Αποθείωση με υπερήχους

Η οξείδωση με υπερήχους αποτελεί μία παραλλαγή της οξειδωτικής αποθείωσης και θεωρείται μία πολλά υποσχόμενη μέθοδος. Τα προϊόντα του πετρελαίου και τα οξειδωτικά μέσα αναμιγνύονται με νερό στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα. Η εφαρμογή των υπερήχων συμβάλλει στον σχηματισμό ενός γαλακτώματος μεταξύ της φάσης του νερού και του πετρελαίου, βελτιώνοντας την επαφή των μορίων τους (Lin, et al., 2020). Παράλληλα, διαμορφώνονται υψηλές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, ευνοώντας την εξέλιξη της οξείδωσης. Οι θειούχες ενώσεις οξειδώνονται σε σουλφοξείδια και σουλφόνες, τα οποία μεταφέρονται στην υγρή φάση. Στο στάδιο της εκχύλισης, η επεξεργασία με υπερήχους μπορεί να αναμίξει αποτελεσματικότερα το εκχυλιστικό μέσο με τα οξειδωμένα μόρια, διευκολύνοντας τον διαχωρισμό τους (Bolla, Choudhury, & Moholkar, 2012).

Αποθείωση με προσρόφηση

Η αποθείωση με προσρόφηση βασίζεται στην ικανότητα μίας στερεής ουσίας να προσροφήσει εκλεκτικά οργανικές θειούχες ενώσεις από τα καύσιμα (Saha, Vedachalam, & Dalai, 2021). Διακρίνεται σε φυσική και χημική προσρόφηση. Η φυσική προσροφητική αποθείωση διεξάγεται συνήθως με την χρήση στερεών προσροφητικών υλικών, διαφορετικού πορώδους και λειτουργικότητας (Ganiyu & Lateef, 2021). Προσροφητές που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ο ενεργός άνθρακας, ο ζεόλιθος καθώς και οξειδία μετάλλων. Όσον αφορά την χημική προσρόφηση, πραγματοποιείται μία χημική αντίδραση ανάμεσα στις οργανικές θειούχες ενώσεις και στη στερεή επιφάνεια του προσροφητικού υλικού. Το θείο επικολλάται στο υλικό και οι αποθειωμένοι υδρογονάνθρακες απελευθερώνονται στο διάλυμα. Πρόκειται για μία διεργασία φιλική προς το περιβάλλον, εύκολη στην εφαρμογή με χαμηλό κόστος. Ωστόσο, μελέτες έχουν δείξει χαμηλή απόδοση της αποθείωσης και γι' αυτόν το λόγο δεν έχει επεκταθεί σε βιομηχανική κλίμακα (Omar & Verma, 2022).

Βιοαποθείωση

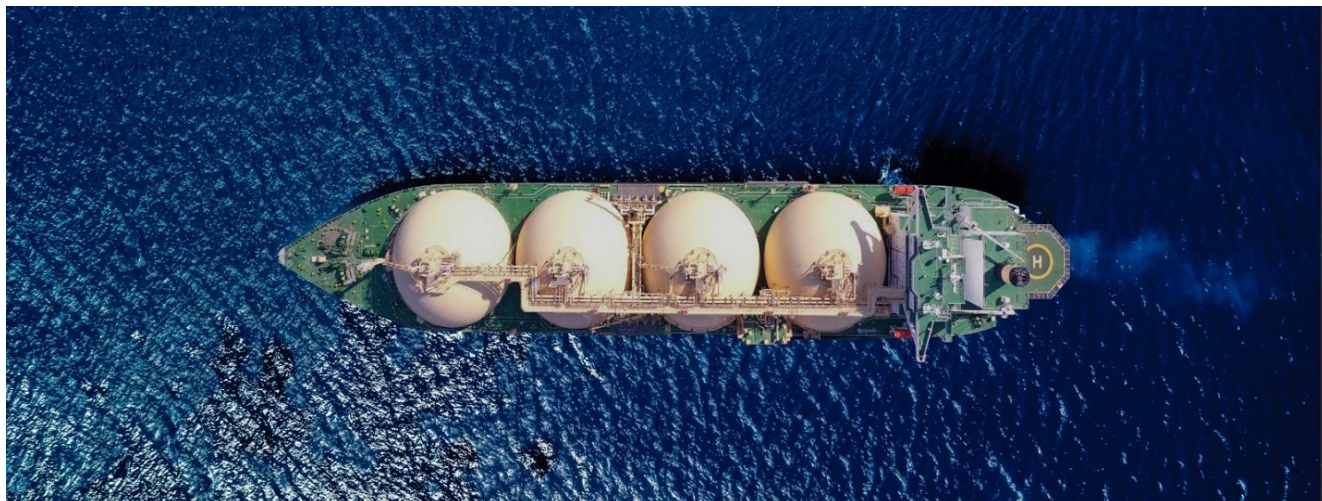
Η συγκεκριμένη μέθοδος αποθείωσης περιλαμβάνει την χρήση μικροοργανισμών, οι οποίοι δεσμεύουν το θείο για την ανάπτυξη τους και τις βιολογικές τους λειτουργίες. Ειδικότερα, οι μικροοργανισμοί με τη βοήθεια των ενζύμων που εκκρίνουν και τις διάφορες μεταβολικές οδούς που ακολουθούν, δύνανται να αποδεσμεύσουν το απαιτούμενο θείο από ενώσεις θειοφενικού τύπου που περιέχονται στο πετρέλαιο (Chafale & Karley, 2022). Η βιοαποθείωση παρουσιάζει πολλά οφέλη, όπως χαμηλό κόστος επένδυσης, ήπιες συνθήκες θερμοκρασίας - πίεσης και υψηλή αποδοτικότητα. Ωστόσο, η εφαρμογή της σε βιομηχανικό επίπεδο δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα διότι φαίνεται να αποδίδει κυρίως σε προϊόντα πετρελαίου που έχουν ούτως ή άλλως χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Παράλληλα, ο αργός ρυθμός εξέλιξης της αποθείωσης αποτελεί τροχοπέδη (Mamuad & Earvin Sy Choi, 2023).

1.2.5 Εναλλακτικές Προτάσεις για Ναυτιλιακά Καύσιμα

Υγροποιημένο φυσικό αέριο

Το **υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)** αποτελεί μία επιλογή που αναπτύσσεται έντονα τα τελευταία χρόνια, ειδικά λόγω των περιβαλλοντικών περιορισμών. Αναλυτικότερα, το φυσικό αέριο είναι ένα μείγμα κορεσμένων υδρογονανθράκων (μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο και βουτάνιο), το οποίο σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος είναι στην αέρια φάση (Gonzalez, 2013). Χρησιμοποιείται σε βιομηχανικό επίπεδο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και ως πρώτη ύλη για διάφορες διεργασίες. Παράλληλα, αξιοποιείται για οικιακή και εμπορική θέρμανση, αλλά και ως καύσιμο μεταφορών. Όταν το φυσικό αέριο ψυχθεί σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (-162°C) μετατρέπεται σε υγρό, διευκολύνοντας τη μεταφορά και την αποθήκευση του (Bai & Jin, 2016).

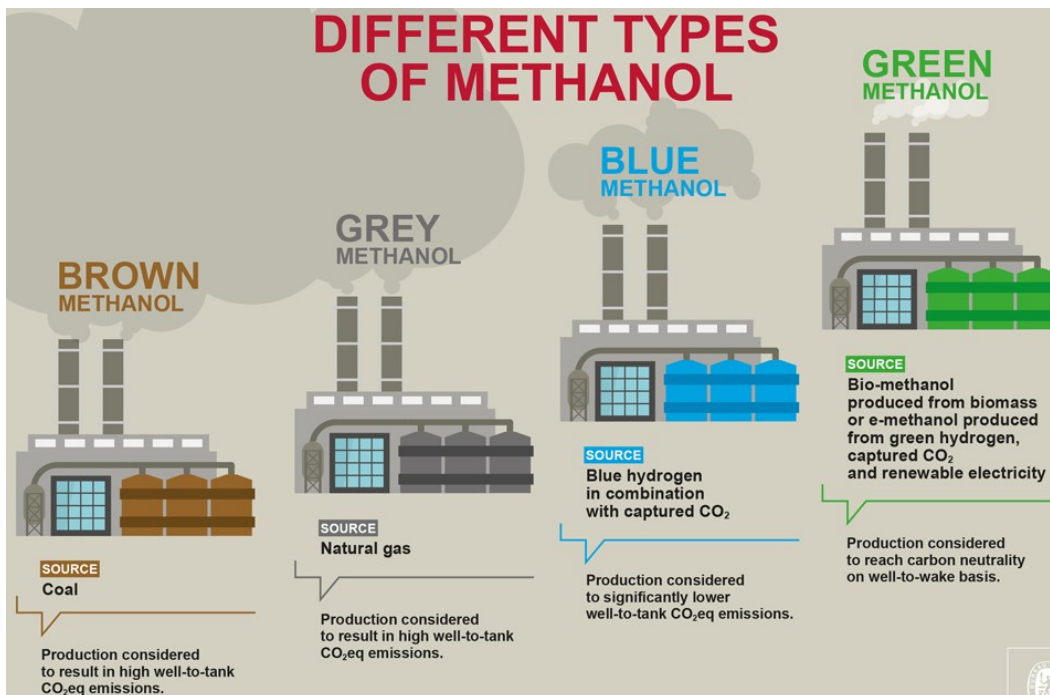
Στο ναυτιλιακό κλάδο, η τεχνολογία που απαιτείται για την χρήση του LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο είναι ήδη διαθέσιμη. Πολλά πλοία χρησιμοποιούν το υγροποιημένο φυσικό αέριο ως καύσιμο για το σύστημα πρόωσης τους λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Οι εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x) και μικροσωματιδίων (PM) από την χρήση του LNG θεωρούνται πολύ χαμηλές συγκριτικά με εκείνες των συμβατικών καυσίμων, τηρώντας τα όρια που έχουν τεθεί από τον [IMO 2020](#) (Thomson, Corbett, & Winebrake, 2015). Παράλληλα, το υγροποιημένο φυσικό αέριο θεωρείται ως μία οικονομική επιλογή καυσίμου, με ένα σχετικά ευρύ δίκτυο ανεφοδιασμού. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι 185 λιμάνια παγκοσμίως διαθέτουν τις κατάλληλες υποδομές για την τροφοδότηση των πλοίων με LNG, ενώ αναμένεται να αυξηθεί ο αριθμός κατά 27% μέχρι το 2025 (Mandra, 2023). Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες προκλήσεις που χρειάζεται να αντιμετωπιστούν και συνδέονται κυρίως με την αποθήκευση του LNG στις δεξαμενές των πλοίων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το LNG μεταφέρεται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες (-162°C), οι οποίες επιτυγχάνονται μέσω της κρυογονικής κατεργασίας (cryogenic treatment). Η εγκατάσταση συστημάτων κρυογονικής εν πλω αποτελεί μία εξαιρετικά πολύπλοκη και ακριβή διαδικασία. Για το λόγο αυτό, συνήθως επιλέγεται η χρήση του LNG ως καύσιμο είτε σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με κατάλληλη μετατροπή του κινητήρα τους, είτε σε νεότευκτα πλοία που έχουν κατασκευαστεί εξ αρχής για το συγκεκριμένο καύσιμο. Εκτός αυτού, οι ακραίες συνθήκες που επικρατούν στις δεξαμενές αποθήκευσης του LNG, τις καθιστούν επικίνδυνες και απαιτούν ειδικό χειρισμό από τα μέλη του πληρώματος (Mokhatab, Mak, Valappil, & Wood, 2013). Επιπλέον, στην περίπτωση διαρροής, το καύσιμο σχηματίζει ένα εύφλεκτο μίγμα με τον αέρα, ενέχοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς ή έκρηξης. Τέλος, η καύση του φυσικού αερίου θεωρείται ότι έχει απόδοση γύρω στο 98%. Αυτό σημαίνει ότι το 2% που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα ως άκαυστο αέριο, γεγονός που εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Gronholm, et al., 2021).



Εικόνα 12: Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG

Μεθανόλη

Η **μεθανόλη** αναπτύσσεται αρκετά τα τελευταία χρόνια, καθώς πρόκειται για ένα καύσιμο που πληροί τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς σχετικά με τις εκπομπές καυσαερίων. Πρόκειται για την πιο απλή αλκοόλη, η οποία έχει χημικό τύπο CH_3OH και σε κανονικές συνθήκες είναι ένα άχρωμο, εύφλεκτο και τοξικό υγρό με χαρακτηριστική οσμή (Clevelant, 2004). Αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες χημικές ενώσεις με ποικίλες εφαρμογές, όπως σε χρώματα, υφάσματα, δομικά υλικά και φαρμακευτικά προϊόντα. Υπάρχουν διάφορες πηγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή μεθανόλης με επικρατέστερες τα ορυκτά καύσιμα και το φυσικό αέριο. Ωστόσο, οι πηγές αυτές οδηγούν στην έκλυση μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Kotowicz, Brzeczek, Walewska, & Szykowska, 2022). Εναλλακτικά, μπορεί να αξιοποιηθεί CO_2 που έχει δεσμευτεί από βιομηχανικές διεργασίες ή βιομάζα, όπως ξύλο και γεωργικά υπολείμματα. Στην εικόνα που ακολουθεί διακρίνεται η κατάταξη της μεθανόλης σε χρωματικές κατηγορίες με βάση την πρώτη ύλη που έχει χρησιμοποιηθεί και το μέγεθος των εκπομπών καυσαερίων:



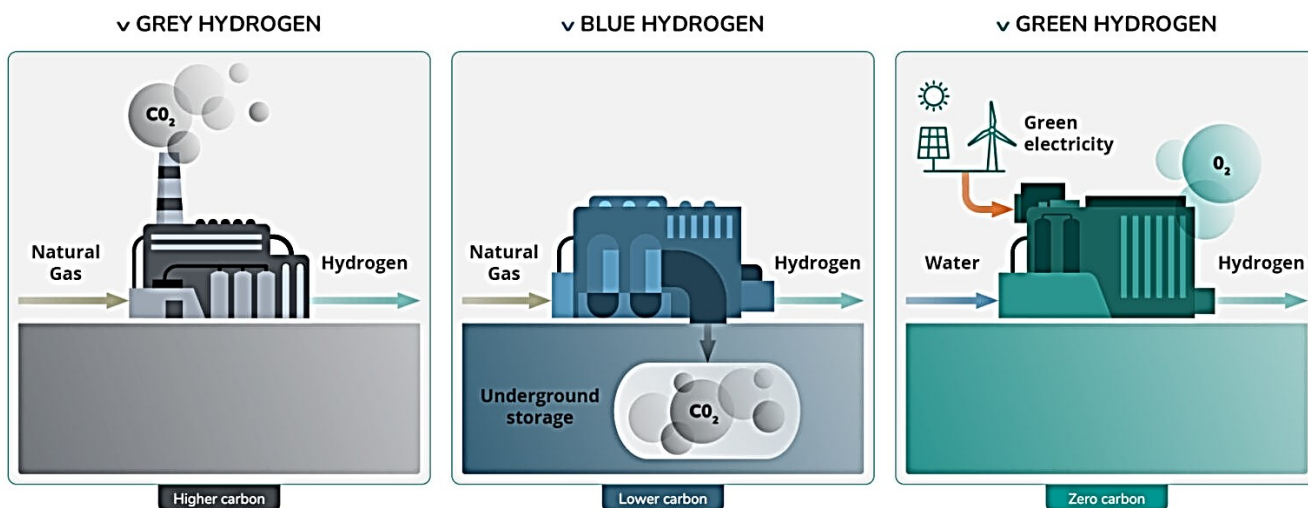
Εικόνα 13: Κατηγοριοποίηση της μεθανόλης με βάση την πηγή άνθρακα

Όσον αφορά τη ναυτιλία, η χρήση μεθανόλης θεωρείται ότι μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των αέριων ρύπων συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα, σε ποσοστό 76.78% για τα NO_x, 89% για τα SO_x, 55% για το CO, 18.13% για το CO₂ και 82.56% για τα μικροσωματίδια (Ammar, 2019). Εκτός αυτού, η υγρή μορφή της αποτελεί ένα πλεονέκτημα, περιορίζοντας τις αλλαγές που χρειάζονται να γίνουν στις υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων. Τέλος, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη διαρροή μεθανόλης στη θάλασσα είναι περιορισμένες καθώς η συγκεκριμένη ένωση διαλύεται στο νερό. Παρ' όλα αυτά, το ενεργειακό της περιεχόμενο είναι χαμηλό, γεγονός που σημαίνει ότι απαιτείται περίπου διπλάσια ποσότητα μεθανόλης για να ανταποκριθεί στις ανάγκες ενός πλοίου (Verhelst, Turner, Sileghem, & Vancoillie, 2019). Ένα ακόμα στοιχείο που εγείρει προβληματισμό είναι το χαμηλό σημείο ανάφλεξης (11°C), γεγονός που απαιτεί ειδικό χειρισμό του καυσίμου και αυξημένα μέτρα ασφαλείας του πληρώματος (Ghosh, 2023). Ακόμη, το δίκτυο για τον ανεφοδιασμό των πλοίων με μεθανόλη δεν έχει αναπτυχθεί αρκετά.

Υδρογόνο

Το **υδρογόνο** (H₂) αποτελεί μία εναλλακτική πρόταση καυσίμου για την πρόωση των πλοίων. Ειδικότερα, πρόκειται για έναν υψηλής ποιότητας ενεργειακό φορέα που διακρίνεται σε κατηγορίες χρωμάτων με βάση το ανθρακικό του αποτύπωμα (Ajjanovic, Sayer, & Haas, 2022). Το **γκρι υδρογόνο** προέρχεται από ορυκτά καύσιμα και παράγεται είτε μέσω της αναμόρφωσης

μεθανίου με ατμό, είτε με αεριοποίηση του άνθρακα, οδηγώντας στην έκκληση μεγάλων ποσοτήτων CO₂ (Hermesmann & Muller, 2022). Το **μπλε υδρογόνο** έχει και αυτό ως κύρια πηγή τα ορυκτά καύσιμα και συντίθεται με τους ίδιους τρόπους, ωστόσο τα καυσαέρια δεσμεύονται και διοχετεύονται στο υπέδαφος. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζονται οι εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα (Φωκιανού, 2020). Η πλέον φιλική κατηγορία είναι το **πράσινο υδρογόνο**, το οποίο παράγεται από την ηλεκτρόλυση νερού με ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από ΑΠΕ (Hoecke, et al., 2021). Ως εκ τούτου, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα περιορίζονται στο 5% εκείνων που εκλύονται από τους άλλους τύπους υδρογόνου.



Εικόνα 14: Κατηγοριοποίηση υδρογόνου με βάση τη μέθοδο παραγωγής του

Βασικό πλεονέκτημα του H₂ είναι ότι παράγεται και χρησιμοποιείται ήδη ως καύσιμο, επομένως υπάρχει η σχετική τεχνογνωσία. Εκτός αυτού, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε μεγάλες ποσότητες υπό πίεση ή/και χαμηλή θερμοκρασία, για μεγάλες χρονικές περιόδους, γεγονός που διευκολύνει ιδιαίτερα την ναυτιλία. Συνηθισμένος τρόπος αποθήκευσης είναι σε ειδικές δεξαμενές όπου το υδρογόνο διατηρείται υπό πίεση. Οι χώροι αυτοί είναι ειδικά σχεδιασμένοι ώστε να αντέχουν την υψηλή πίεση που κυμαίνεται από 350 έως 700 bar. Άλλη μέθοδος αποθήκευσης είναι σε υγρή κατάσταση, η οποία επιτυγχάνεται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου στους -253° C. Η διατήρηση των συγκεκριμένων συνθηκών πραγματοποιείται σε ειδικές δεξαμενές, ανθεκτικές σε ακραίες θερμοκρασίες. Όσον αφορά τους υπάρχοντες κινητήρες, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κατάλληλες μετατροπές, ωστόσο ως πιο αποδοτικές κρίνονται οι **κυψέλες καυσίμου**. Πρόκειται για μηχανισμούς που επιτρέπουν τη μετατροπή του υδρογόνου και του οξυγόνου σε νερό, παράγοντας ηλεκτρισμό και θερμότητα (Omatick, et al., 2022). Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης και άλλων συστημάτων του πλοίου. Τα κυριότερα

πλεονεκτήματα είναι οι μηδενικές εκπομπές ρύπων, η μειωμένη ηχορύπανση, η υψηλή απόδοση ενέργειας και οι περιορισμένες ανάγκες για συντήρηση. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη συγκριτικά με τις παραδοσιακές μηχανές εσωτερικής καύσης με αποτέλεσμα να έχουν λιγότερες φθορές και εκτεταμένη διάρκεια ζωής. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που χρειάζεται να διευθετηθούν προκειμένου η πρόωση των πλοίων να ανατεθεί στα κυψέλες καυσίμων. Η δημιουργία αξιόπιστων υποδομών εφοδιασμού υδρογόνου, ιδίως σε απομακρυσμένες ή λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές, καθώς και το υψηλό κόστος των συστημάτων που συνοδεύουν τις κυψέλες (Hoecke, et al., 2021). Παράλληλα, το υδρογόνο είναι ένα εύφλεκτο αέριο που μπορεί να σχηματίσει εκρηκτικά μείγματα με τον αέρα. Εκτός αυτού, το H_2 μπορεί να φθείρει το υλικό της δεξαμενής αποθήκευσης και με την πάροδο του χρόνου να υπάρξουν διαρροές. Για το λόγο αυτό, καθίσταται απαραίτητη η ανάπτυξη νέων πρωτοκόλλων ασφαλείας, που δεν υφίστανται επί του παρόντος για τον σωστό χειρισμό και την αποθήκευση του υδρογόνου εν πλω.

Αμμωνία

Η **αμμωνία** (NH_3) είναι μία ανόργανη χημική ένωση, η οποία σε συνθήκες περιβάλλοντος έχει τη μορφή άχρωμου αερίου με χαρακτηριστική αποπνικτική οσμή (Βαλαβανίδης & Ευσταθίου, 2011). Θεωρείται ως η πλέον διαδεδομένη χημική ένωση του αζώτου, βρίσκεται στη φύση σε διάφορες μορφές και παράγεται σε ποσότητες εκατομμυρίων τόνων ετησίως. Χρησιμοποιείται κυρίως στον γεωργικό τομέα ως λίπασμα, καθώς και στην παραγωγή πλαστικών, φαρμακευτικών προϊόντων και εκρηκτικών (Machaj, et al., 2022). Η αμμωνία παράγεται κυρίως μέσω της μεθόδου Haber-Bosch, στην οποία αξιοποιείται το άζωτο της ατμόσφαιρας και υδρογόνο που προέρχεται από φυσικό αέριο, συνήθως. Τα αέρια αζώτου και υδρογόνου αντιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα αέριο σύνθεσης, το οποίο με τη συμβολή καταλύτη και συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας – πίεσης μετατρέπεται σε αμμωνία (Pattabathula & Richardson, 2016). Ωστόσο, η διαδικασία αυτή οδηγεί στην έκλυση υψηλών ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Στο ναυτιλιακό τομέα, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ως καύσιμο η **πράσινη αμμωνία**, δηλαδή η χημική ένωση που έχει παραχθεί με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποδίδοντας μηδενικούς ρύπους. Ένα βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου καυσίμου είναι ότι με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε Μ.Ε.Κ., όσο και σε κυψέλες καυσίμου. Μάλιστα, υπερτερεί στο κομμάτι αυτό καθώς η αποθήκευση της πραγματοποιείται σε πιο ήπιες συνθήκες ($-33^\circ C$) συγκριτικά με εκείνες του υδρογόνου ($-253^\circ C$) (Herson, 2023). Επιπλέον, η αμμωνία είναι λιγότερο εύφλεκτη και έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για τη διεκπεραίωση μεγάλων ταξιδιών. Παράλληλα, πρόκειται για ένα χημικό προϊόν που παράγεται και διακινείται ήδη, επομένως υπάρχουν και οι υποδομές και τα κατάλληλα πρωτόκολλα ασφαλείας για τη διανομή και μεταφορά του (Sveistrup Jacobsen, Krantz, Mouftier, & Skov Christiansen, 2022). Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα θέματα που χρειάζεται να

ληφθούν σοβαρά υπόψη προτού ξεκινήσει ευρέως η χρήση της στον ναυτιλιακό κλάδο. Η αμμωνία είναι μία τοξική και εύφλεκτη ένωση που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής για να μην προκαλέσει προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, απαιτείται να αναπτυχθούν παραπάνω οι υποδομές αποθήκευσης και διανομής ώστε να υποστηρίξουν πλήρως την χρήση της ως ναυτιλιακό καύσιμο. Τέλος, αν και η καύση της αμμωνίας δεν παράγει εκπομπές CO₂, εκπέμπονται οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία αποτελούν και αυτά επιβλαβείς ρύπους (Ariemma, Sorrentino, Ragucci, Joannon, & Sabia, 2022).

Βιοκαύσιμα

Μία κατηγορία καυσίμων που αναπτύσσονται έντονα τα τελευταία χρόνια είναι τα βιοκαύσιμα. Ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει αέρια ή υγρά καύσιμα που έχουν ως πρώτη ύλη τη βιομάζα, δηλαδή οποιοδήποτε υλικό προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς (Vetter, Kuhnert, & Smith, 2022). Υπάρχουν δύο τύποι βιομάζας: οι υπολειμματικές μορφές (αγροτικά – δασικά υπολείμματα, απόβλητα κτηνοτροφίας και πόλεων, οργανικό κλάσμα απορριμμάτων) και η βιομάζα που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες (πχ τεύτλα, σιτάρι, σόργο, ελαιοκράμβη) (Χριστακόπουλος & Τόπακας, 2016). Αν και υπάρχουν διάφορα είδη βιοκαυσίμων, η τεχνολογία γύρω από τον ναυτιλιακό κλάδο έχει επικεντρωθεί κυρίως στο **βιοντήζελ** και το **βιοαέριο**.



Εικόνα 15: Εργοστάσιο παραγωγής βιοκαυσίμων

Το **βιοντήζελ** αποτελείται από μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων, μακρίας αλυσίδας και παρασκευάζεται από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη μέσω της μετεστεροποίησης (Bhatia,

2014). Πρόκειται για ένα υγρό, καθαρό καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του, είτε αναμειγμένο με συμβατικό ντίζελ στους ναυτιλιακούς κινητήρες. Χαρακτηρίζεται ως μη τοξικό και βιοδιασπώμενο, δεν περιέχει αρωματικές ενώσεις, έχει πολύ χαμηλές εκπομπές SO_x, μικροσωματιδίων, αιθάλης και CO (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Εκτός αυτών, έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και ενισχύει τη λίπανση στις αντλίες τροφοδοσίας και το εσωτερικό των κινητήρων, διασφαλίζοντας την εύρυθμη λειτουργία τους. Κατά την αποθήκευση του εν πλω, υπερτερεί συγκριτικά με το συμβατικό ντίζελ καθώς διαθέτει υψηλότερο σημείο ανάφλεξης (127°C) γεγονός που το καθιστά ασφαλέστερο. Ωστόσο, είναι επιρρεπές στην ανάπτυξη μικροοργανισμών εξαιτίας της παρουσίας νερού. Υπάρχουν είδη ενζύμων, μυκήτων και βακτηρίων, τα οποία αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια μεταξύ καυσίμου και οποιουδήποτε αδέσμευτου νερού που έχει συσσωρευτεί στο κατώτατο μέρος της δεξαμενής (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Οι οργανισμοί αυτοί δημιουργούν ιλύ και γλοιώδεις επικαθίσεις που μπορούν να προξενήσουν το φράξιμο των φίλτρων. Παράλληλα, το βιοντίζελ εμφανίζει μειωμένη ρευστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί με την ανάμιξη του με συμβατικό ντίζελ (Miller & Bjornstad, 2013). Το κόστος του μπορεί να ποικίλλει με βάση τις πρώτες ύλες που έχουν επιλεγεί και τη μέθοδο παραγωγής του, δημιουργώντας πολυπλοκότητα στην τιμολόγηση του. Τέλος, το δίκτυο διανομής του δεν έχει αναπτυχθεί αρκετά για να υποστηρίξει την χρήση του στο ναυτιλιακό τομέα.

Το **βιοαέριο** αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH₄), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και μικρές ποσότητες άλλων αερίων (Carrannelli, McGlade, Zeniewski, & Le Feuvre, 2019). Συντίθεται μέσω της αναερόβιας πέψης οργανικής ύλης, απουσία οξυγόνου. Ως πρώτη ύλη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν γεωργικά υπολείμματα (πχ καλαμπόκι, άχυρο σιταριού και ρυζιού), κοπριά, υπολείμματα τροφίμων από νοικοκυριά και εστιατόρια, παραπροϊόντα από βιομηχανίες τροφίμων και ποτών (Bumbiere, et al., 2020). Πρόκειται για ένα καύσιμο φιλικό προς το περιβάλλον, μιας και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, διοξειδίου του θείου και μικροσωματιδίων είναι περιορισμένες. Παράλληλα, η περιεκτικότητά του σε θείο είναι χαμηλή, γεγονός που συμβαδίζει με τους νέους κανονισμούς (IMO 2020) και μπορεί να παράγεται τοπικά, διευκολύνοντας τη διαθεσιμότητά του. Εξετάζοντας τη δυνατότητα του βιοαερίου να χρησιμοποιηθεί ως ναυτιλιακό καύσιμο, υπάρχουν ορισμένα θέματα που χρειάζεται να διευθετηθούν. Η σύνθεση του βιοαερίου μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την πρώτη ύλη που έχει επιλεγεί, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει την απόδοση και τις εκπομπές του κινητήρα. Μάλιστα, η επάρκεια των πρώτων υλών μπορεί να διαφέρει με βάση την εποχικότητα και την τοποθεσία (Mallouppas, Yfantis, Ioannou, Paradeisiotis, & Ktoris, 2023). Τέλος, η αποθήκευση του βιοαερίου εν πλω μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη διατήρησή του σε συμπιεσμένη ή υγροποιημένη μορφή. Συγκεκριμένα, το συμπιεσμένο βιοαέριο μπορεί να αποθηκευτεί σε δεξαμενές υψηλής πίεσης, που κυμαίνεται από 200 έως 250 bar. Άλλος τρόπος διατήρησής του είναι σε υγροποιημένη μορφή όπου αποθηκεύεται σε δεξαμενές χαμηλής θερμοκρασίας, περίπου στους -160°C. Η χρήση του ως καυσίμου απαιτεί την επαναεριοποίηση του μέσω της αναθέρμανσης. Συγκρίνοντας τις δύο βασικές μεθόδους

αποθήκευσης θεωρείται ότι η συμπιεσμένη μορφή του βιοαερίου έχει χαμηλότερο κόστος υποδομών και εξοπλισμού σε σχέση με την υγροποιημένη φάση του. Ωστόσο, η αποθήκευση υγροποιημένου βιοαερίου προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, επιτρέποντας την εκτέλεση μεγαλύτερων αποστάσεων, χωρίς την ανάγκη ανεφοδιασμού.

Τα **πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα** των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά στο ναυτιλιακό τομέα, παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα που ακολουθεί. Κοινό πλεονέκτημα όλων αποτελεί η εκπομπή μειωμένων καυσαερίων.

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα εναλλακτικών, ναυτιλιακών καυσίμων (LNG, μεθανόλη, υδρογόνο)

Είδος καυσίμου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος καυσίμου • Διαθέσιμη τεχνολογία • Ευρύ δίκτυο ανεφοδιασμού 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος εγκατάστασης συστημάτων κρυογονικής • Επικίνδυνες συνθήκες αποθήκευσης • Κίνδυνος πυρκαγιάς ή έκρηξης στην περίπτωση διαρροής • Διαφυγή άκαυστου μεθανίου στην ατμόσφαιρα
Μεθανόλη	<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένες μετατροπές στις υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης • Ευδιάλυτη στο νερό στην περίπτωση διαρροής στη θάλασσα 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο • Περιορισμένη ανάπτυξη του δικτύου ανεφοδιασμού πλοίων • Χαμηλό σημείο ανάφλεξης – Κίνδυνος πυρκαγιάς
Υδρογόνο	<ul style="list-style-type: none"> • Διαθέσιμη τεχνολογία • Μειωμένη ηχορύπανση • Υψηλή απόδοση ενέργειας • Περιορισμένες ανάγκες συντήρησης 	<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένη ανάπτυξη του δικτύου ανεφοδιασμού • Υψηλό κόστος συστημάτων • Εύφλεκτο αέριο • Φθορές στις δεξαμενές αποθήκευσης

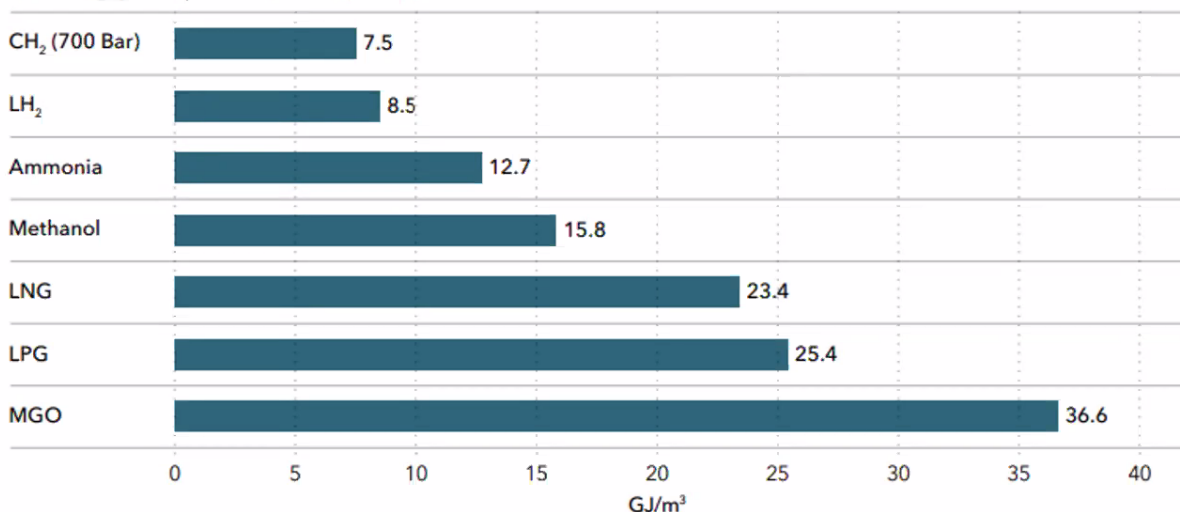
Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα εναλλακτικών, ναυτιλιακών καυσίμων (Αμμωνία, βιοκαύσιμα)

Είδος καυσίμου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αμμωνία	<ul style="list-style-type: none"> • Περιορισμένες μετατροπές στις υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης • Ήπιες συνθήκες αποθήκευσης • Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα • Διαθέσιμη τεχνολογία 	<ul style="list-style-type: none"> • Τοξική και εύφλεκτη χημική ένωση • Περιορισμένη ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης και διανομής • Εκπομπές NOx
Βιοκαύσιμα	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο • Ενισχυμένη λίπανση του κινητήρα • Λιγότερο εύφλεκτο 	<ul style="list-style-type: none"> • Επιρρεπές στην ανάπτυξη μικροβίων (βιοντήζελ) • Μειωμένη ρευστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες (βιοντήζελ) • Περιορισμένη ανάπτυξη του δικτύου ανεφοδιασμού • Ποικιλία στη σύνθεση του αναλόγως των πρώτων υλών

Στην εικόνα που ακολουθεί πραγματοποιείται μία σύγκριση του **ενεργειακού περιεχομένου** εναλλακτικών καυσίμων με συμβατικά. Διακρίνεται ότι υπάρχει έντονη διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών, εκτός από τις επιλογές **LNG – LPG** που δεν υστερούν σημαντικά.

Volumetric energy density of alternative fuels

Units: Gigajoules per cubic metre (GJ/m³)



Key: Compressed hydrogen (CH₂); liquefied hydrogen (LH₂); liquefied natural gas (LNG); liquefied petroleum gas (LPG); marine gas oil (MGO)

Εικόνα 16: Σύγκριση ενεργειακού περιεχόμενου καυσίμων

1.2.6 Κατανάλωση καυσίμων

Ο ρυθμός κατανάλωσης των ναυτιλιακών καυσίμων καθορίζεται από διάφορες παραμέτρους, με σημαντικότερη την **ταχύτητα πλεύσης** (Bialystocki & Konovessis, 2016). Ειδικότερα, τα πλοία σχεδιάζονται να ταξιδεύουν σε δεδομένες ταχύτητες ανάλογα με τον τύπο τους προκειμένου να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες που συναντούν στις θαλάσσιες οδούς. Χαρακτηριστικά σημειώνεται ότι τα πλοία ομοειδών φορτίων (bulk carriers) κινούνται με 13-15 ναυτικούς κόμβους, τα εμπορευματοκιβωτιοφόρα (container ships) με 16-24 κόμβους και τα δεξαμενόπλοια (tankers) με 13-17 κόμβους (Lindstad, Asbjornslett, & Stromman, Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds, 2011). Η ισχύς που χρειάζεται να παραχθεί για την πρόωση των καραβιών είναι συνάρτηση της ταχύτητας τους και έτσι η ελάττωση της οδηγεί στη μειωμένη κατανάλωση των καυσίμων (Lindstad, Eskeland, Psaraftis, Sandaas, & Stromman, 2015). Ωστόσο, η ταχύτητα δεν είναι ο μόνος παράγοντας που διαμορφώνει την ένταση χρήσης των καυσίμων. Ο αριθμός των περιστροφών ανά λεπτό (RPM) του κινητήρα, η διανυθείσα απόσταση, το βύθισμα του πλοίου, ο όγκος του μεταφερόμενου φορτίου, η τραχύτητα του σκάφους και οι καιρικές συνθήκες επηρεάζουν επίσης την κατανάλωση (Isikli, Aydin, Bilgili, & Toprak, 2020).

1.2.7 Ανεφοδιασμός Ναυτιλιακών Καυσίμων

Ο ανεφοδιασμός των πλοίων με καύσιμα αποτελεί το **υψηλότερο κόστος** ενός ταξιδιού και προϋποθέτει προσεκτικό σχεδιασμό από τους αρμόδιους. Αναλυτικότερα, η επιλογή του λιμανιού που θα διεξαχθεί η πετρέλευση, η ποσότητα που πρόκειται να λάβει το πλοίο, καθώς και το χρονικό σημείο του ταξιδιού που θα πραγματοποιηθεί αποτελούν αποφάσεις υψηλής σημασίας (Aronietis, Sys, van Hassel, & Vanelslander, 2017). Ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή των σημείων ανεφοδιασμού είναι το κόστος των καυσίμων (Schinas & Ourolidis, 2022). Ακολουθούν η ποιότητα των καυσίμων, η γεωγραφική θέση του λιμανιού ως προς το δρομολόγιο που πραγματοποιεί ένα πλοίο, καθώς και η ποιότητα των υπηρεσιών. Εκτός αυτών, η διαθεσιμότητα καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο τα τελευταία χρόνια, λόγω των περιβαλλοντικών περιορισμών. Συνήθως, η λήψη των καυσίμων γίνεται όταν το πλοίο δεν φέρει κάποιο φορτίο στις δεξαμενές του και βρίσκεται σε αναμονή για την επόμενη ναύλωση. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις που η πετρέλευση γίνεται όταν είναι φορτωμένο με το εμπόρευμα. Η μεταφορά των καυσίμων πραγματοποιείται με μικρότερα πλοία που πλησιάζουν παραπλεύρως το καράβι, καθώς και με φορτηγά στις περιπτώσεις που η ποσότητα είναι περιορισμένη (Fuentes, 2021). Τα **σημαντικότερα λιμάνια** για τον ανεφοδιασμό καυσίμων για το **2021** παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

*Πίνακας 5: Τα σημαντικότερα λιμάνια παγκοσμίως για τον ανεφοδιασμό καυσίμων
(UNCTAD, 2021)*

Κατάταξη	Λιμάνια
1	Σιγκαπούρη
2	Φουτζέιρα
3	Ρότερνταμ
4	Χονγκ Κονγκ
5	Παναμάς
6	Ζουσάν
7	Μπουσάν
8	Γιβραλτάρ
9	Αμβέρσα
10	Χιούστον

1.2.8 Εξέλιξη τιμών καυσίμων

Ο ανεφοδιασμός των πλοίων με καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την πρόωση τους συνιστά ένα υψηλό κόστος, το οποίο μπορεί να προσεγγίσει το **54%** των συνολικών εξόδων λειτουργίας τους, σε ετήσια βάση (Merien-Paul, Enshaei, & Jayasinghe, 2019). Η τιμή των καυσίμων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες με κυριότερους την παγκόσμια ζήτηση πετρελαίου, το κόστος επεξεργασίας του, τις κοινωνικοπολιτικές εξελίξεις και τις φυσικές καταστροφές. Συγκεκριμένα, η **αυξημένη ζήτηση πετρελαίου** και των παραγώγων του οδηγεί σε αντίστοιχη άνοδο των τιμών και αντιστρόφως. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίοδος της πανδημίας (covid-19), κατά την οποία η απαγόρευση των μετακινήσεων οδήγησε σε σημαντική μείωση της ζήτησης των πετρελαϊκών προϊόντων (Khan, Su, & Zhu, 2022). Το γεγονός αυτό επέφερε πτώση της τιμής τους παγκοσμίως και οδήγησε στην αύξηση των ναύλων των δεξαμενόπλοιων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως αποθήκες, μιας και δεν ήταν εφικτή η διοχέτευση μεγάλων ποσοτήτων πετρελαίου στην αγορά. Πέρα από τα παραπάνω, οι **επιλογές συμμόρφωσης** των ναυτιλιακών εταιρειών με τη νομοθεσία του **IMO 2020** επηρεάζουν σημαντικά την ζήτηση και κατ' επέκταση τις τιμές. Ο εφοπλιστικός κόσμος μπορεί να διαλέξει μεταξύ της χρήσης καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και της εγκατάστασης ενός ιδιαίτερος ακριβού συστήματος επεξεργασίας των καυσαερίων, με ένα μέσο κόστος 2-3 εκατομμυρίων δολαρίων για να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν HFO. Συνεπώς, η υψηλή ζήτηση του VLSFO οδηγεί σε αύξηση της τιμής του συγκριτικά με το HFO. Ένας άλλος παράγοντας που διαμορφώνει την τιμή των καυσίμων είναι το **κόστος της επεξεργασίας** που απαιτείται για να λάβουν τις επιθυμητές ιδιότητες. Ειδικότερα, τα διυλιστήρια χρειάζεται να προβούν σε σημαντικές τροποποιήσεις των εγκαταστάσεων τους προκειμένου να μπορέσουν να παράγουν τα σύγχρονα καύσιμα που θα έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (Sultanbekov, Denisov, Zhurkevich, & Islamov, 2022). Ως εκ τούτου, μεταφέρεται ένα αυξημένο κόστος στην τελική τιμή των καυσίμων, όπως το VLSFO και το MGO. Τέλος, οι **κοινωνικοπολιτικές εξελίξεις** επηρεάζουν τις τιμές των καυσίμων. Το πιο σύγχρονο παράδειγμα είναι ο πόλεμος στην Ουκρανία, ο οποίος οδήγησε σε εκτόξευση των τιμών των καυσίμων, μιας και οι κυρώσεις στην Ρωσία επέφεραν μείωση της προσφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου (Elliott, 2022).

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών ορισμένων βασικών τύπων ναυτιλιακών καυσίμων (VLSFO 0.5%, MGO 0.1%, LNG, IFO380), για τα τελευταία χρόνια. Τα δεδομένα έχουν εξαχθεί από την ιστοσελίδα [Bunker Index](#) και αφορούν τα σημαντικότερα λιμάνια της υφηλίου.

Πιο συγκεκριμένα, στις εικόνες που ακολουθούν εμφανίζεται η διακύμανση των τιμών σε μονάδες USD/metric ton για το καύσιμο **VLSFO**, περιεκτικότητας σε θείο 0.5% και για το **MGO**, συγκέντρωσης σε θείο 0.1% για την Σιγκαπούρη, την Φουτζέιρα και το Ρότερνταμ. Τα δεδομένα

αφορούν το χρονικό διάστημα 2019 – 2023 και 2018 – 2023, αντίστοιχα. Είναι φανερή η υπέρμετρη αύξηση της τιμής τους το 2022, γεγονός που αποδίδεται κατά κύριο λόγο στον πόλεμο της Ουκρανίας. Οι περιορισμοί που επιβλήθηκαν στην Ρωσία οδήγησαν στην αύξηση της τιμής των καυσίμων, μιας και οι καταναλωτές στράφηκαν σε εναλλακτικές πηγές προμήθειας, συχνά όμως από πιο απομακρυσμένες περιοχές.

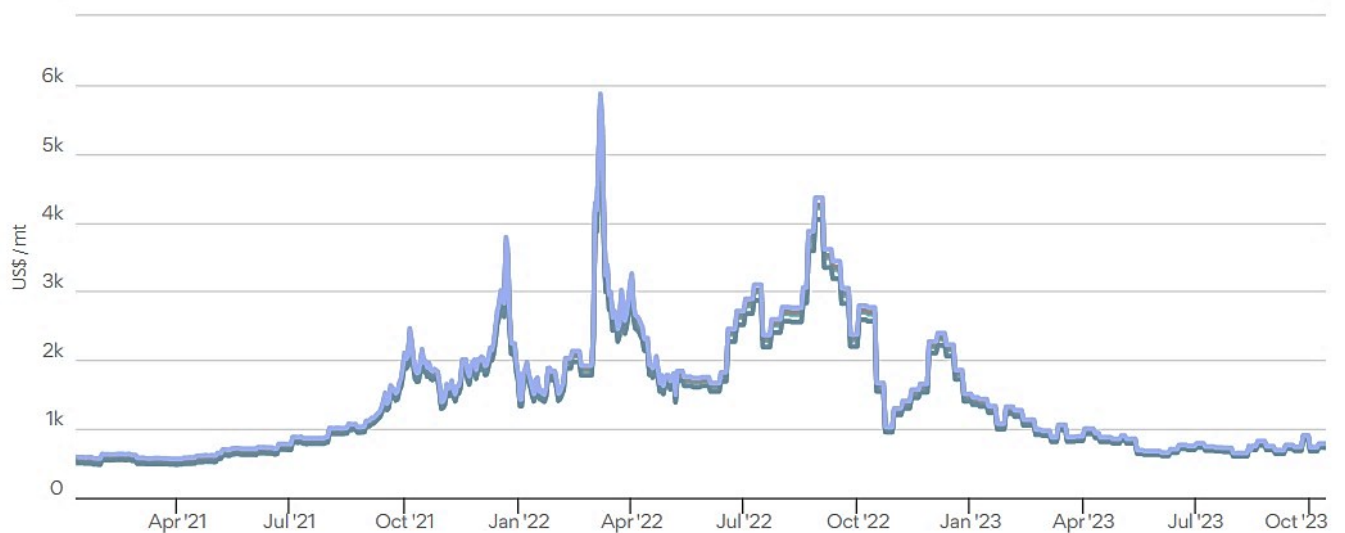


Εικόνα 17: Διακύμανση τιμών VLSFO 0.5% (USD/metric ton) για το διάστημα 2019 – 2023 για τα λιμάνια της Σιγκαπούρης, της Φουτζέιρα και του Ρότερνταμ



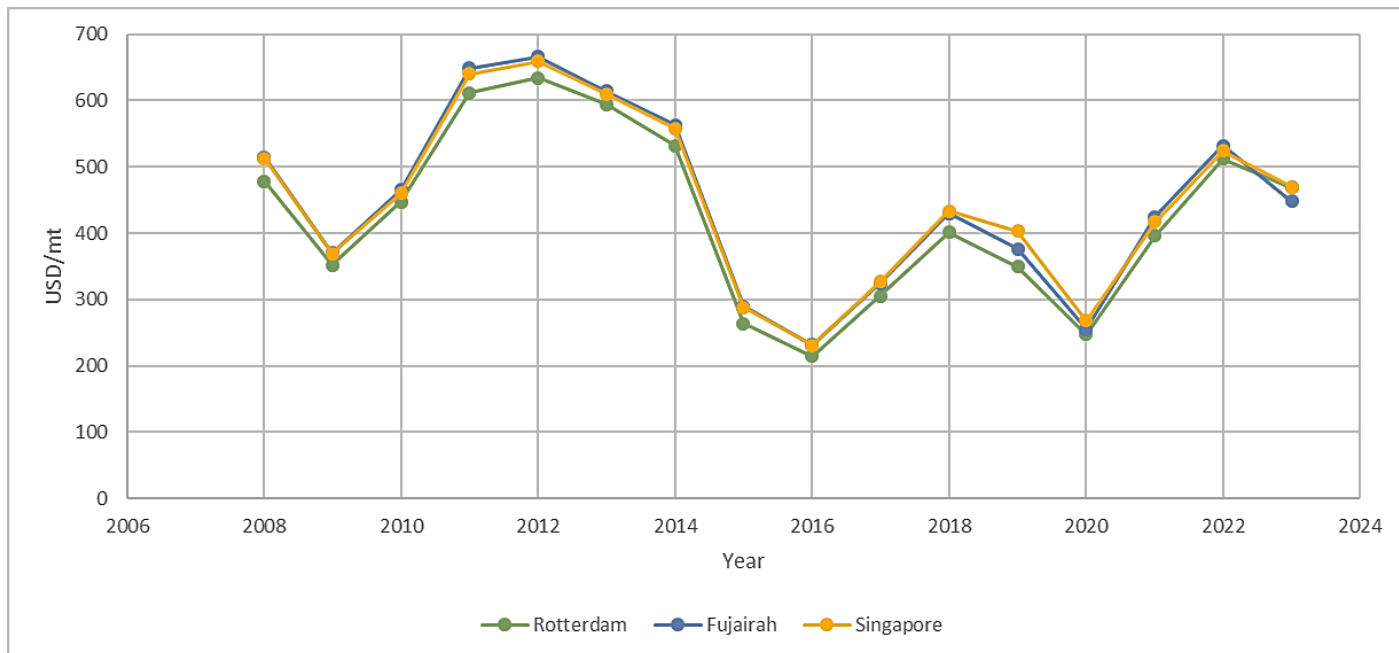
Εικόνα 18: Διακύμανση τιμών MGO 0.1% (USD/metric ton) για το διάστημα 2018 – 2023 για τα λιμάνια της Σιγκαπούρης, της Φουτζέιρα και του Ρότερνταμ

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών του LNG για το χρονικό διάστημα 2021 – 2023. Τα στοιχεία αφορούν τα λιμάνια της Σιγκαπούρης, του Ρότερνταμ, του Αμβούργου και του Γιβραλτάρ.



Εικόνα 19: Διακύμανση τιμών LNG (USD/metric ton) για το διάστημα 2021 – 2023 για τα λιμάνια της Σιγκαπούρης, του Ρότερνταμ, του Αμβούργου και του Γιβραλτάρ

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών του IFO 380 για το χρονικό διάστημα 2008 – 2023. Τα στοιχεία αφορούν τα λιμάνια της Σιγκαπούρης, του Ρότερνταμ και της Φουτζέιρα.



Εικόνα 20: Διακύμανση τιμών IFO 380 (USD/metric ton) για το διάστημα 2008 – 2023 για τα λιμάνια της Σιγκαπούρης, του Ρότερνταμ και της Φουτζέιρα

2.1 Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί

Ο ναυτιλιακός κλάδος διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στο παγκόσμιο εμπόριο καθώς αποτελεί τον κύριο τρόπο μεταφοράς αγαθών παγκοσμίως, σε ποσοστό άνω του 80% (UNCTAD, 2021). Παράλληλα, όμως, συνιστά και έναν ιδιαίτερα ρυπογόνο παράγοντα για το περιβάλλον. Η ρύπανση εντοπίζεται τόσο στον υδάτινο χώρο εξαιτίας της απόρριψης βλαβερών ουσιών, όσο και στην ατμόσφαιρα λόγω των καυσαερίων που εκπέμπονται. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η ναυτιλία παράγει το **3%** των αερίων που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το **13%** των οξειδίων αζώτου (NO_x) που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, καθώς και το **12%** των οξειδίων θείου (SO_x) (Mueller, Westerby, & Nieuwenhuijsen, 2023). Εκτός αυτών, εκπέμπον και άλλες ουσίες, όπως μικροσωματίδια (PM) και μεθάνιο (CH_4), τα οποία είναι βλαβερά για την υγεία (Serra & Fancello, 2020). Σε μια προσπάθεια περιορισμού της περιβαλλοντικής ρύπανσης, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (IMO) έθεσε σε εφαρμογή τον Ιανουάριο του 2020, έναν παγκόσμιο κανονισμό βάση του οποίου η περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων περιορίζεται στο 0.5% για πλοία που κινούνται εκτός των περιοχών ελέγχου εκπομπών (Emission Control

Areas) (IMO 2020 - Cleaner shipping for cleaner air , 2019). Στόχος της συγκεκριμένης νομοθεσίας είναι η μείωση κατά **77%** των εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x) που οφείλονται στον ναυτιλιακό κλάδο.

2.1.1. Περιβαλλοντικός Αντίκτυπος της Ναυσιπλοΐας

Η ναυτιλία δύναται να επιδεινώσει την **περιβαλλοντική ρύπανση** ποικιλοτρόπως, όπως έχει ήδη αναφερθεί συνοπτικά. Ειδικότερα, η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας οφείλεται κυρίως στην καύση των **προϊόντων του πετρελαίου** που προστίθενται στους κινητήρες και κατ' επέκταση στις εκπομπές ενώσεων, όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα οξείδια του θείου (SO_x) και του αζώτου (NO_x), καθώς και τα αιωρούμενα μικροσωματίδια (Particulate Matters - PM).

Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Τα βαριά υπολειμματικά καύσιμα (HFO) έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα με αποτέλεσμα η καύση τους να οδηγεί στην έκλυση σημαντικών ποσοτήτων CO₂ (Carvalho, et al., 2023). Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άχρωμο και άοσμο αέριο, το οποίο υφίσταται και από μόνο του στην ατμόσφαιρα. Δεν έχει επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου, ούτε συμμετέχει σε χημικές αντιδράσεις που μπορούν να παράγουν άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους. Ωστόσο, αποτελεί το σημαντικότερο αέριο που εντείνει το **φαινόμενο του θερμοκηπίου**, οδηγώντας στην σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη (Ζιώμας, 2007).

Οξείδια του θείου (SO_x)

Τα **οξείδια του θείου** απελευθερώνονται επίσης κατά την καύση των ναυτιλιακών καυσίμων, καθώς το θείο αποτελεί μέρος της σύστασης τους που κυμαίνεται από 0.05-10% κ.β. (Papadopoulos, Kourtelesis, Moschovi, Sakkas, & Yakoumis, 2022). Το επικρατέστερο αέριο που εκπέμπεται είναι το SO₂, μια ιδιαίτερα τοξική και διαβρωτική ένωση, η οποία ευθύνεται για την επιβάρυνση της ανθρώπινης υγείας και ιδιαίτερα του αναπνευστικού συστήματος. Εκτός αυτού, τα οξείδια του θείου αντιδρούν με άλλες ουσίες σχηματίζοντας μικρά σωματίδια, τα οποία εισχωρούν στους πνεύμονες, δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα (Sulfur Dioxide Basics, 2023). Τέλος, τα SO_x είναι υπεύθυνα και για περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως είναι η όξινη βροχή, η αύξηση της οξύτητας των επιφανειακών υδάτων και αλλοιώσεις στη βλάστηση.

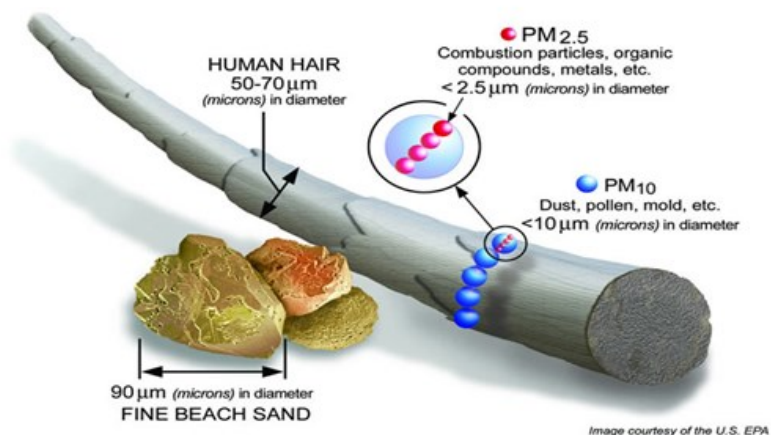
Οξείδια του αζώτου (NO_x)

Τα **οξείδια του αζώτου** σχηματίζονται εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν στις μηχανές εσωτερικής καύσης και της παρουσίας μίγματος αέρα - καυσίμου (Alagumalai, Jodati, Mahian, & Ashok, 2022). Έχουν επιπτώσεις τόσο στην ανθρώπινη υγεία, όσο και στο περιβάλλον.

Συγκεκριμένα, η μακροχρόνια έκθεση σε διοξείδιο του αζώτου (NO_2) μπορεί να οδηγήσει σε επιβάρυνση του αναπνευστικού συστήματος, στην εμφάνιση άσθματος, ακόμα και καρκίνου των πνευμόνων. Όσον αφορά το περιβάλλον, τα οξείδια του αζώτου συμμετέχουν στη φωτοχημική ομίχλη ή αλλιώς νέφος που εμφανίζεται στις σύγχρονες πόλεις δημιουργώντας δυσκολία στην ορατότητα. Παράλληλα, εντείνουν την όξινη βροχή καθώς και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, είτε άμεσα με την εμφάνιση του υποξειδίου του αζώτου (N_2O), είτε έμμεσα συμμετέχοντας στον σχηματισμό του τροποσφαιρικού όζοντος (O_3) (Ζιώμας, 2007).

Αιωρούμενα μικροσωματίδια (PM)

Πρόκειται για μικροσκοπικά, στερεά σωματίδια ή σταγονίδια υγρών που αιωρούνται στον αέρα και ποικίλλουν σε μέγεθος και σύνθεση, προερχόμενα από διάφορες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Nriagu, 2019). Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 0.01 έως 10 μm , όμως διακρίνονται συνήθως σε δύο μεγάλες κατηγορίες **PM_{2.5}** (για διάμετρο ίση ή μικρότερη των 2.5 μm) και **PM₁₀** (για διάμετρο ίση ή μικρότερη των 10 μm). Τα αιωρούμενα σωματίδια στην ατμόσφαιρα έχουν πολύ σημαντικές, περιβαλλοντικές συνέπειες (Ζιώμας, 2007). Σε υψηλές συγκεντρώσεις αποτελούν ένα σημαντικό κίνδυνο για την υγεία του αναπνευστικού συστήματος. Μάλιστα, η έκθεση σε PMs έχει συνδεθεί σε ένα μεγάλο βαθμό με την εμφάνιση καρκίνου των πνευμόνων καθώς και καρδιαγγειακής ανεπάρκειας (Fuzzi, et al., 2015). Παράλληλα, τα σωματίδια απορροφούν και διαχέουν την ορατή ακτινοβολία, περιορίζοντας την ορατότητα της ατμόσφαιρας και επιδεινώνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τέλος, χρησιμεύουν σαν πυρήνες συμπύκνωσης για τη δημιουργία νεφών και συμμετέχουν σε διάφορες χημικές αντιδράσεις.



Εικόνα 21: Σύγκριση μεγέθους αιωρούμενων μικροσωματιδίων με ανθρώπινη τρίχα

2.1.2. Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας – IMO

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization) αποτελεί έναν παγκόσμιο φορέα, η σύσταση του οποίου πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα των Ηνωμένων Εθνών, το **1948**. Ο ρόλος του είναι η λήψη μέτρων με σκοπό τη διασφάλιση της παγκόσμιας ναυτιλίας, καθώς και τον περιορισμό της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος και της ατμόσφαιρας από τις ναυτιλιακές δραστηριότητες (Introduction to IMO, n.d.). Οι κοινοί δεσμευτικοί κανόνες που ακολουθούν πλέον οι χώρες μέλη του IMO διευκολύνουν την εφαρμογή τους και συμβάλλουν στην αποτροπή ναυτικών ατυχημάτων. Σημαντικές συμβάσεις καθορίζουν την ασφάλεια της ζωής στη θάλασσα (**SOLAS**) και τον περιορισμό της θαλάσσιας ρύπανσης (**MARPOL**). Ειδικότερα, ο κανονισμός SOLAS περιλαμβάνει τις βασικές προδιαγραφές που χρειάζεται να ακολουθεί ένα πλοίο κατά τη ναυπήγηση και τη λειτουργία του σε τομείς όπως είναι η ευστάθεια, ο εξοπλισμός, οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, τα συστήματα πυρόσβεσης και διάσωσης (International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, n.d.). Η σύμβαση MARPOL περιέχει μια πλειάδα κανόνων που στοχεύουν στην πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης από τη ναυσιπλοΐα ή την πρόκληση ατυχημάτων, καθώς και στην αποκατάσταση της υπάρχουσας περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), n.d.). Αξίζει να σημειωθεί ότι το 2015, ο IMO έθεσε μια σειρά στόχων με την ονομασία **2030 Agenda for Sustainable Development**, αποσκοπώντας στην εξάλειψη της φτώχειας και της πείνας, στην αυξημένη πρόσβαση στην υγεία, την εκπαίδευση και τη δικαιοσύνη. Ταυτόχρονα, στηρίζει την οικονομική ανάπτυξη με σεβασμό απέναντι στο περιβάλλον, επιχειρώντας τον περιορισμό των ρυπογόνων δραστηριοτήτων.



Εικόνα 22: 2030 Agenda for Sustainable Development

2.1.3 Περιοχές Ελεγχόμενων Εκπομπών Αερίων – ECA

Πρόκειται για συγκεκριμένες περιοχές, στις οποίες εφαρμόζονται αυστηροί κανονισμοί σύμφωνα με το **παράρτημα VI** της σύμβασης **Marpol 1997**, αναφορικά με τις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂) (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), n.d.). Για το λόγο αυτό, λαμβάνουν συχνά την ονομασία **SECAs** – Sulphur Emission Control Areas. Σε αυτές εντάσσονται η Βαλτική και η Βόρεια Θάλασσα, οι ακτές των Ηνωμένων Πολιτειών, του Καναδά και της Καραϊβικής. Τα πλοία, τα οποία εισέρχονται σε αυτές, οφείλουν να χρησιμοποιούν καύσιμα με μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο ίση με **0.10%** κατά βάρος (Camoying, 2022). Μάλιστα, τα σκάφη οφείλουν να έχουν ολοκληρώσει την εναλλαγή των καυσίμων τους τουλάχιστον 12 ώρες προτού προσεγγίσουν τις SECAs έτσι ώστε να έχουν απομακρυνθεί υπολείμματα του HFO από το σύστημα των σωληνώσεων τους. Μία εναλλακτική πρόταση είναι η εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (**scrubbers**), τα οποία επιτρέπουν την χρήση υπολειμματικών καυσίμων (HFO) ακόμα και στις SECAs. Οι περιοχές

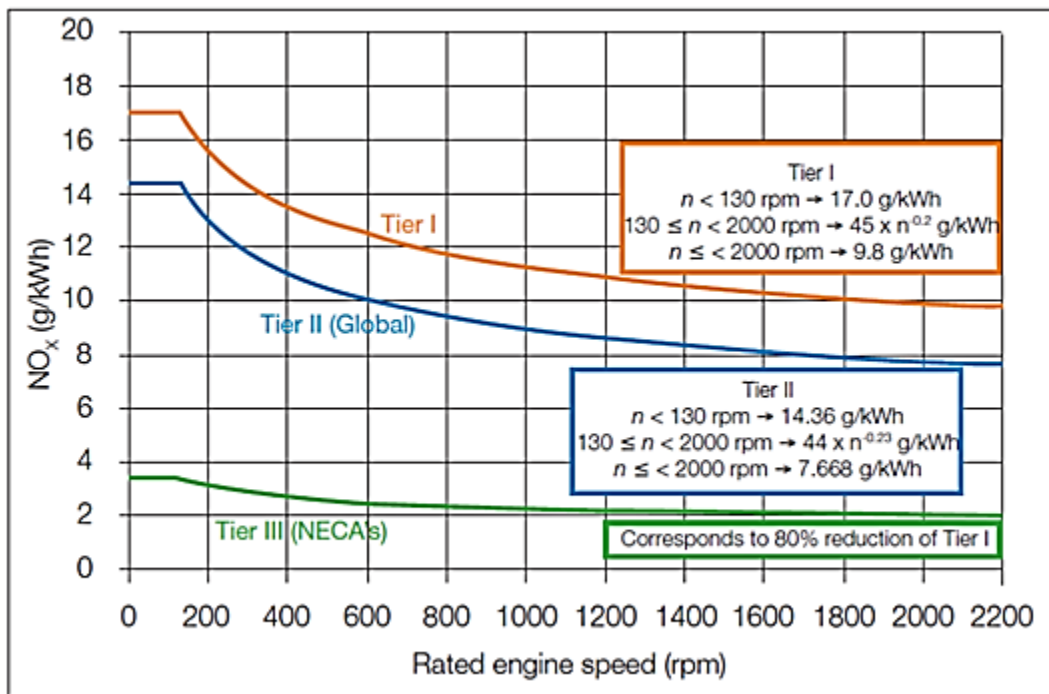
αυτές έχουν επιλεγεί με βάση την ωκεανογραφική και οικολογική τους κατάσταση, καθώς και τη συχνότητα διέλευσης πλοίων.

Εκτός των SECAs, υπάρχουν και περιοχές ελέγχου των **οξειδίων του αζώτου** (NO_x) τα οποία εκλύονται στην ατμόσφαιρα. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται συντόμως ως **NECAs** – NO_x Emissions Control Areas και έχουν τεθεί σε ισχύ από τις αρχές Αυγούστου 2012 σύμφωνα με τον **κανονισμό 13**, του **παραρτήματος VI** της σύμβασης **Marpol** (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), n.d.). Πρόκειται για τις ακτογραμμές της Βόρειας Αμερικής, συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών και του Καναδά. Σύμφωνα με τον κανονισμό, οι κινητήρες των πλοίων διαχωρίζονται σε **τρεις κατηγορίες** με βάση το έτος κατασκευής τους και τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (Ghoshy, 2022):

Πίνακας 6: Κατηγοριοποίηση των μηχανών με βάση το έτος κατασκευής τους

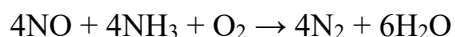
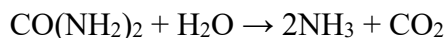
Κατηγορίες	Διάστημα κατασκευής μηχανών
Tier I	01/01/2000 – 01/01/2011
Tier II	01/01/2011 – 01/01/2016
Tier III	> 01/01/2016

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα που ακολουθεί στο οποίο διακρίνονται τα επίπεδα εκπομπών των οξειδίων του αζώτου με βάση την κατηγοριοποίηση Tier των κινητήρων και την ταχύτητα στην οποία λειτουργούν:



Εικόνα 23: Εκπομπές οξειδίων του αζώτου με βάση την κατηγοριοποίηση Tier

Στις **NECAs** μπορούν να εισέλθουν πλοία, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία **Tier III**, αλλά και σκάφη των άλλων δύο ομάδων εφόσον εφαρμόζουν μεθόδους επεξεργασίας των καυσαερίων τους. Οι διαδικασίες που εφαρμόζονται συνήθως είναι η επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (Selective Catalytic Reduction - **SCR**) και η τεχνολογία ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation - **EGR**). Αναλυτικότερα, η πρώτη μέθοδος αφορά την έγχυση υδατικού διαλύματος ουρίας (**CO(NH₂)₂**) στο ρεύμα των καυσαερίων του κινητήρα, παρουσία καταλύτη (Inoue & Yokoyama, 2018). Η συγκεκριμένη ένωση αντιδρά με τα οξείδια του αζώτου, παράγοντας νερό και άζωτο σε μία σειρά αντιδράσεων που παρουσιάζεται ακολούθως:



Η **ανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR)** είναι μία εναλλακτική μέθοδος που δύναται να εφαρμοστεί για τον έλεγχο των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Ειδικότερα, ένα μέρος των καυσαερίων που εξέρχονται από τους κινητήρες ψύχεται, καθαρίζεται και επαναπροωθείται στον θάλαμο καύσης, αφού έχει εμπλουτιστεί με αέρα (Latarche, 2021). Με τον τρόπο αυτό, περιορίζεται η θερμοκρασία των καυσαερίων, μειώνοντας κατ' επέκταση τη μέγιστη θερμοκρασία καύσης που αναπτύσσεται εντός του θαλάμου. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ελάττωση του σχηματισμού οξειδίων του αζώτου, βοηθώντας τα πλοία να συμμορφώνονται με τους

περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Παρόλο που, η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ελαφρά μείωση της απόδοσης του κινητήρα εξαιτίας της χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης, θεωρείται ότι συμβάλλει στην εξοικονόμηση καυσίμου. Αυτό οφείλεται στις μειωμένες ανάγκες για πρόσθετες τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών καυσαερίων (Ghoshy, 2022).



Εικόνα 24: Περιοχές ECA

Η **μη συμμόρφωση** με τους κανονισμούς που διέπουν τις περιοχές ελέγχου μπορεί να οδηγήσει σε νομικές και οικονομικές συνέπειες, καθώς και σε δυσφήμιση των ναυτιλιακών εταιρειών (Global Sulphur Cap 2020, n.d.). Ειδικότερα, η παραβίαση της νομοθεσίας ενδέχεται να επιφέρει δικαστικές διενέξεις με περιβαλλοντικές οργανώσεις και πληγείσες κοινότητες. Επιπλέον, η χρήση μη συμμορφούμενων καυσίμων μπορεί να επιφέρει την επιβολή προστίμων, καθώς και άλλων κυρώσεων όπως η απαγόρευση δραστηριοποίησης εντός ορισμένων περιοχών. Τέλος, μπορεί να οδηγήσει στην κράτηση των σκαφών για κάποιο χρονικό διάστημα, γεγονός που συνεπάγεται καθυστερήσεις στο ταξίδι που έχουν προγραμματίσει και έτσι απώλεια χρημάτων.

Αξίζει να αναφερθεί ο όρος **FONAR** – Fuel Oil Non-Availability Report, στην περίπτωση που ένα πλοίο δεν έχει καταφέρει να αγοράσει τα κατάλληλα καύσιμα. Σύμφωνα με τον **κανονισμό 18.2 του παραρτήματος VI** της σύμβασης **Marpol**, αν ένα πλοίο δεν δύναται να προμηθευτεί καύσιμα που να πληρούν τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς, χρειάζεται να ενημερώσει τις αρχές στο λιμάνι που πλησιάζει, καθώς και το κράτος της σημαίας την οποία φέρει. Έπειτα, οφείλει να ετοιμάσει μία αναφορά, γνωστή ως **FONAR**, περιγράφοντας τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν στην προσπάθεια συμμόρφωσης με τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς, καθώς και να προσκομίσει αποδεικτικά στοιχεία (Fuel oil non-availability report (FONAR),

2019). Οι λιμενικές αρχές θα εξετάσουν τα έγγραφα και όλα τα στοιχεία και θα αποφασίσουν αν χρειάζεται να επιβληθεί οποιαδήποτε ποινή.

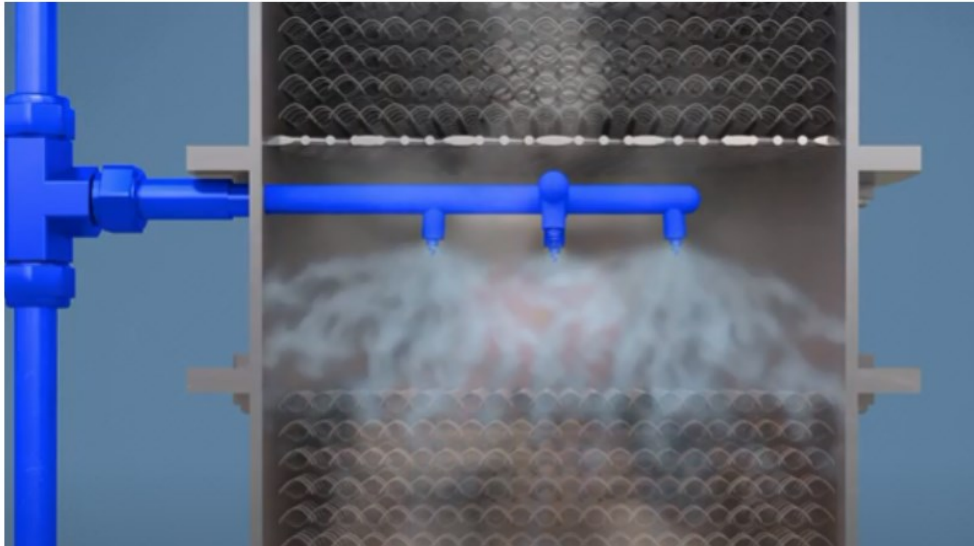
2.1.4 IMO 2020

Στις αρχές Ιανουαρίου 2020, τέθηκε σε ισχύ μία νέα σύμβαση του Διεθνή Οργανισμού Ναυσιπλοΐας, γνωστή με την ονομασία **IMO 2020**, που στοχεύει στον περιορισμό των εκπομπών των **οξειδίων του θείου** από τα πλοία (IMO 2020 - Cutting sulphur oxide emissions, n.d.). Ειδικότερα, η νομοθεσία καθορίζει ότι το περιεχόμενο των ναυτιλιακών καυσίμων σε θείο οφείλει να είναι χαμηλότερο του 0.50% m/m, εκτός από τις περιοχές SECA (Sulfur Emission Control Areas), όπου το ποσοστό ανέρχεται στο 0.10% m/m. Θεωρείται ότι με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί μία μείωση της τάξης του 75-80% στις συνολικές εκπομπές οξειδίων του θείου από τη ναυτιλία, οδηγώντας σε βελτιωμένα ατμοσφαιρικά επίπεδα (Alvarez, 2021). Το γεγονός αυτό θα έχει σημαντικά οφέλη τόσο για τον άνθρωπο, όσο και για την χλωρίδα και την πανίδα του πλανήτη. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι οι καρδιαγγειακές παθήσεις και ο καρκίνος των πνευμόνων αναμένεται να μειωθούν έως και 68% μέχρι το 2025, χάρις την εφαρμογή του IMO 2020.

Η **εναρμόνιση της λειτουργίας** των πλοίων με τον κανονισμό IMO 2020 μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις βασικούς τρόπους. Πρώτα απ' όλα, η χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, σε ποσοστό από **0.1 – 0.5%** είναι μία από τις πρώτες λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν (Ji, 2020). Το ποσοστό 0.1% αφορά τις ECA περιοχές, στις οποίες επιβάλλονται αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί έλεγχοι. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός IFO 180/380 και ενός καυσίμου που δεν θα φέρει θείο στη σύσταση του με σκοπό το τελικό αποτέλεσμα να τηρεί τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Αλλιώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (Li, Wu, Gu, Yuen, & Xiao, 2020). Η επιλογή αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη μιας και δεν απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις στο πλοίο, ούτε υψηλά κεφάλαια. Ωστόσο, σε βάθος χρόνου αποδεικνύεται ότι το αυξημένο κόστος των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο μπορεί να μην είναι μία οικονομικά συμφέρουσα επιλογή.

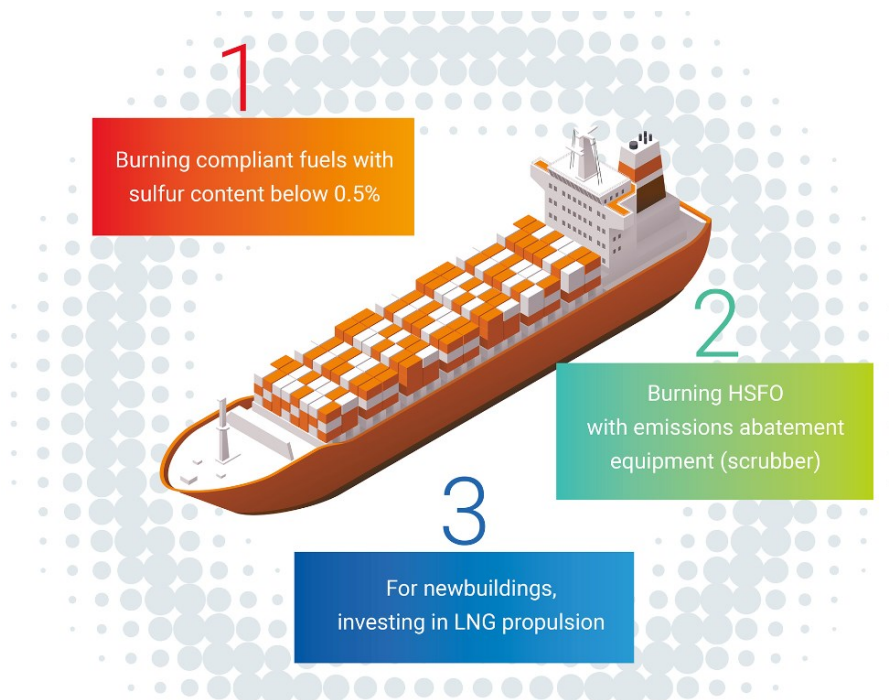
Ο **δεύτερος τρόπος** συμμόρφωσης των πλοίων με τη νομοθεσία IMO 2020 είναι η εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού των καυσαερίων, γνωστών ως scrubbers. Αναλυτικότερα, ο ρόλος των συγκεκριμένων συστημάτων είναι η κατάλληλη επεξεργασία των καυσαερίων που εκπέμπονται από τις ναυτιλιακές μηχανές με σκοπό την αφαίρεση επιβλαβών ουσιών, όπως είναι τα οξείδια του θείου (Poulsen, Strom, Sasic, Sorensen, & Condra, 2023). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή, τα καράβια συνεχίζουν να χρησιμοποιούν τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα, η τιμή των οποίων είναι καλύτερη συγκριτικά με εκείνα που έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Ωστόσο, το κόστος ενός συστήματος scrubber είναι ιδιαίτερα υψηλό, μιας και κυμαίνεται μεταξύ

των 2-4 εκατομμυρίων δολαρίων. Παράλληλα, η εγκατάσταση ενός συστήματος καθαρισμού των καυσαερίων στα πλοία προϋποθέτει τη διακοπή της ναυσιπλοΐας για κάποιο χρονικό διάστημα μιας και οι διεργασίες χρειάζεται να πραγματοποιηθούν από εξειδικευμένες ομάδες σε κατάλληλους χώρους. Το γεγονός αυτό οδηγεί όμως σε απώλεια χρημάτων.



Εικόνα 25: Απεικόνιση του εσωτερικού τμήματος ενός scrubber - Ψεκάσμός των καυσαερίων

Ο **τρίτος τρόπος** συμμόρφωσης με τη νομοθεσία IMO 2020 αφορά την χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου ως καύσιμο. Το LNG έχει χαμηλές εκπομπές οξειδίων του θείου, όπως έχει ήδη [αναφερθεί παραπάνω](#), επομένως η χρήση του είναι σύμφωνη με τη νέα περιβαλλοντική νομοθεσία. Ωστόσο, η αξιοποίηση του ως ναυτιλιακό καύσιμο εγείρει κάποιους προβληματισμούς σχετικά με τις τροποποιήσεις που πρέπει να λάβουν χώρα στις εγκαταστάσεις εν πλω, καθώς και στη διαθεσιμότητα του για ανεφοδιασμό (Pavlenko, Comer, Zhou, Clark, & Rutherford, 2020).



Εικόνα 26: Τρόποι συμμόρφωσης των πλοίων με τη νομοθεσία IMO 2020

3.1 Συστήματα Καθαρισμού Καυσαερίων – Scrubbers

3.1.1 Εξέλιξη των συστημάτων υγρού και ξηρού καθαρισμού καυσαερίων

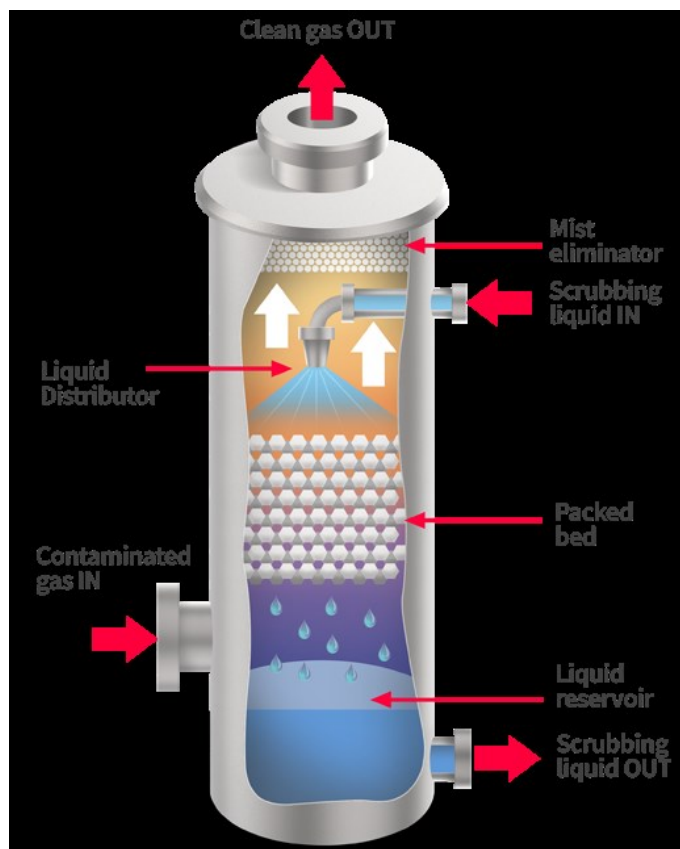
Η ανάγκη περιορισμού των βλαβερών ουσιών που εκπέμπονταν από τη βιομηχανία στην ατμόσφαιρα οδήγησε στη δημιουργία των πρώτων **συστημάτων υγρού καθαρισμού καυσαερίων** ήδη από το 1930 (Venselaar, 1992). Αρχικά, η λειτουργία των συγκεκριμένων μηχανημάτων περιλάμβανε τον ψεκασμό των αερίων που εκπέμπονταν από τις βιομηχανικές μονάδες με νερό σε ειδικούς θαλάμους που ονομάζονται πλυντρίδες. Ωστόσο, η πρακτική αυτή ήταν αναποτελεσματική μιας και μπορούσε να συγκρατηθεί μόνο ένα μικρό ποσοστό των σωματιδίων και των βλαβερών ουσιών (Zhao & Liu, 2022). Παράλληλα, απαιτούσε μεγάλες ποσότητες νερού, γεγονός που ήταν σημαντικό μειονέκτημα για τις περιοχές που η παροχή δεν ήταν εύκολη. Για το λόγο αυτό, άρχισαν να χρησιμοποιούνται **αλκαλικά διαλύματα**, όπως το καυστικό νάτριο, τα οποία σημείωναν υψηλότερη αποτελεσματικότητα ως προς την απομάκρυνση διάφορων όξινων αέριων ρύπων (SO_2 , HCl). Στα σημαντικότερα **πλεονεκτήματα** των συστημάτων υγρού καθαρισμού (**wet scrubbers**) εντάσσεται η ποικιλία των αέριων ρύπων που μπορούν να συγκρατήσουν, η υψηλή αποδοτικότητα τους και η λειτουργία τους σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, εξασφαλίζοντας ασφαλέστερες συνθήκες εργασίας για τους χειριστές τους. Στα

μειονεκτήματα τους περιλαμβάνονται το αυξημένο κόστος τους, τόσο για αγορά, όσο και για συντήρηση, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, καθώς και η χρήση χημικών ενώσεων.



Εικόνα 27: Απεικόνιση του εσωτερικού χώρου ενός wet scrubber

Με την πάροδο του χρόνου, η ανάγκη ελέγχου των αέριων εκπομπών εντάθηκε με αποτέλεσμα την περαιτέρω εξέλιξη των συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων και την εδραίωση τους στη βιομηχανία. Προς το τέλος του 20^{ου} αιώνα, άρχισαν να σχεδιάζονται τα πρώτα **dry scrubbers**, συστήματα δηλαδή που περιέχουν **σωματίδια αλκαλικού απορροφητικού υλικού** τα οποία αλληλοεπιδρούν με τα καυσαέρια, παράγοντας ένα στερεό υποπροϊόν (Kianh, 2018). Συνήθως, το στερεό υλικό που χρησιμοποιείται είναι υδροξείδιο του ασβεστίου σε μορφή σφαιριδίων, τα οποία αντιδρούν με τα οξείδια του θείου που περιέχονται στα καυσαέρια, παράγοντας νερό και γύψο, ένα ακίνδυνο υλικό (Ladwig & Blythe, 2017). Τα σύγχρονα μηχανήματα καθαρισμού καυσαερίων διαθέτουν αισθητήρες και συστήματα ελέγχου για τη βέλτιστη απόδοση τους και τον περιορισμό κατανάλωσης ενέργειας. Στα βασικά **πλεονεκτήματα** των συγκεκριμένων συστημάτων είναι οι περιορισμένες ανάγκες σε νερό, το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και ο πιο απλοποιημένος σχεδιασμός διευκολύνοντας την χρήση και την συντήρηση τους. Στα **μειονεκτήματα** τους εντάσσεται η χαμηλότερη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση ρύπων και η παραγωγή στερεών αποβλήτων.



Εικόνα 28: Απεικόνιση εσωτερικής διάταξης συστήματος καθαρισμού *dry scrubber*

3.1.2 Είδη και λειτουργία συστημάτων υγρού καθαρισμού

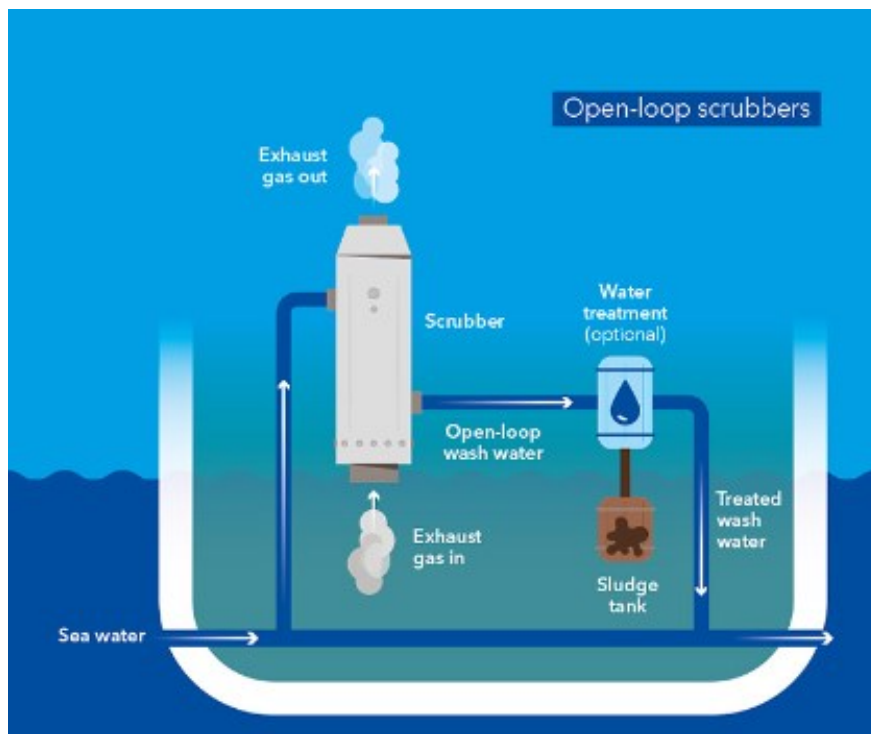
Τα συστήματα υγρού καθαρισμού καυσαερίων – scrubbers διακρίνονται σε τρεις τύπους: ανοιχτού κύκλου (**open loop system**), κλειστού κύκλου (**closed loop system**) και υβριδικά (**hybrid system**). Η βασική αρχή λειτουργίας και των τριών συστημάτων είναι η διέλευση των καυσαερίων από το εσωτερικό τους και ο ψεκασμός τους με κάποιο υγρό διάλυμα προκειμένου να απομακρυνθούν τα οξείδια του θείου. Οι scrubbers τοποθετούνται πίσω από τις καπνοδόχους, όπου με κατάλληλες τροποποιήσεις διέρχονται τα καυσαέρια από το εσωτερικό τους.



Εικόνα 29: Εγκατάσταση συστήματος καθαρισμού καυσαερίων (scrubber)

Συστήματα καθαρισμού ανοιχτού κύκλου

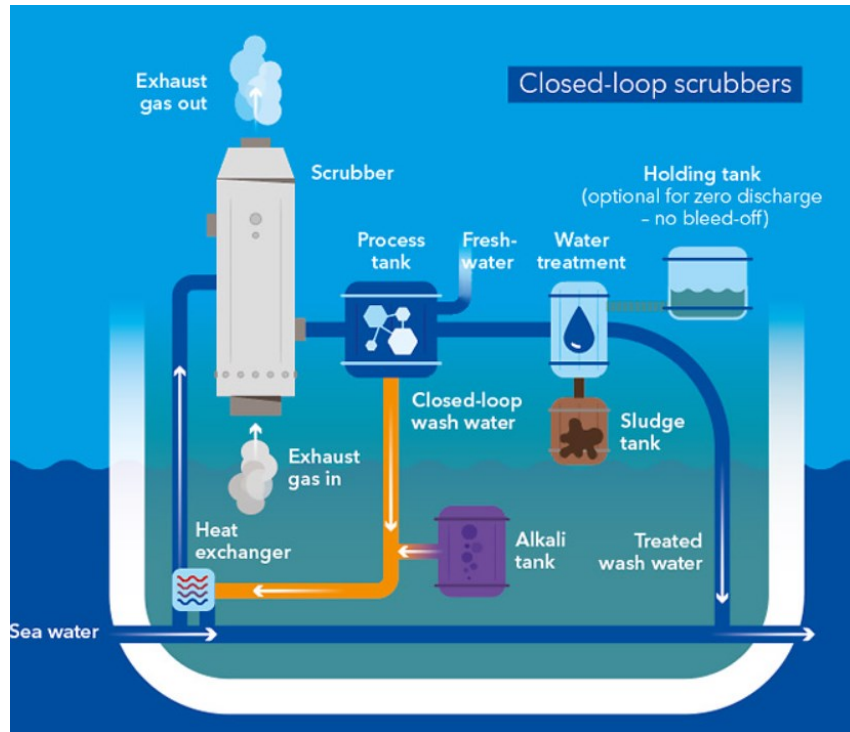
Τα **συστήματα καθαρισμού ανοιχτού κύκλου** (open loop system) χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό για τη δέσμευση των SO_x . Ο όρος ανοιχτός κύκλος αφορά την πρόσληψη του απαραίτητου νερού απευθείας από τη θάλασσα με σκοπό να έρθει σε επαφή μέσω ψεκασμού με τα καυσαέρια (Poulsen, Strom, Sasic, Sorensen, & Condra, 2023). Η αλκαλική φύση του θαλασσινού νερού επιτρέπει την αντίδραση του με τα οξείδια του θείου που περιλαμβάνονται στα καυσαέρια και τη μετατροπή τους σε θειικό οξύ. Το υγρό που εξέρχεται από το σύστημα καθαρισμού απορρίπτεται στη θάλασσα. Τα συστήματα καθαρισμού ανοιχτού κύκλου αποτελούν την πιο συχνή επιλογή για την εγκατάσταση στα πλοία, σε ποσοστό 81.29% (Martinez-Lopez, Marrero, Martin-Cruz, & Miguez Gonzalez, 2022). Βασικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου είναι η απουσία επιβλαβών χημικών, καθώς και η έλλειψη σύνθετων διατάξεων που χρειάζονται τα υπόλοιπα είδη. Ωστόσο, η απόρριψη στη θάλασσα του υγρού που εξέρχεται από τα μηχανήματα έχει αρχίσει ήδη να απαγορεύεται σε περιοχές υψηλής κυκλοφοριακής κίνησης. Σκοπός είναι να αποφευχθεί η μόλυνση των υδάτων με όξινα διαλύματα που ενδεχομένως περιέχουν βαρέα μέταλλα, αρωματικούς υδρογονάνθρακες και μικροσωματίδια, επικίνδυνα για τα θαλάσσια είδη (Comer, 2020). Ορισμένα από τα πιο σημαντικά μέρη που έχει ήδη απαγορευτεί η χρήση των συστημάτων ανοιχτού κύκλου είναι η Σιγκαπούρη, η Φουτζέιρα, το Ντουμπάι, τα τούρκικα και τα ρουμάνικα λιμάνια, η διώρυγα του Σουέζ, το Βέλγιο και η Γαλλία σε απόσταση τριών ναυτικών μιλίων από την ακτογραμμή τους.



Εικόνα 30: Σύστημα καθαρισμού καυσαερίων ανοιχτού κύκλου (open loop system)

Συστήματα καθαρισμού κλειστού κύκλου

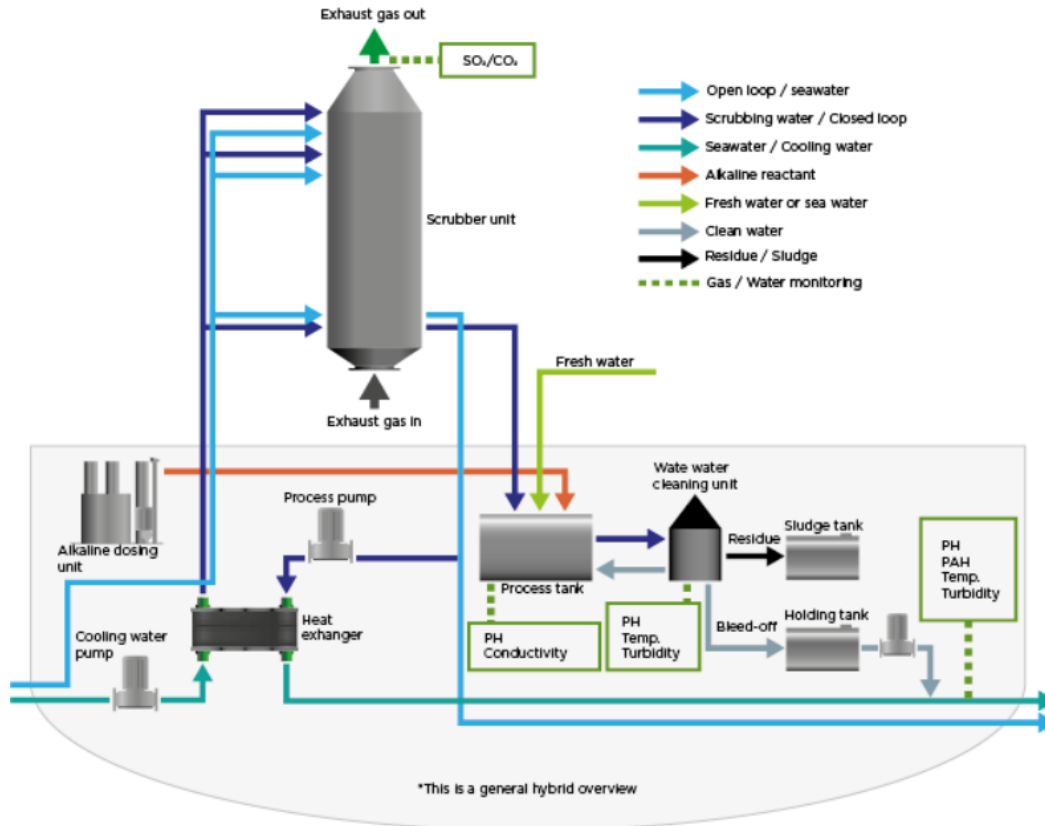
Τα **συστήματα καθαρισμού κλειστού κύκλου** (closed loop system) χρησιμοποιούν γλυκό νερό στο οποίο προστίθεται διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) για τη δέσμευση των SO_x από τα καυσαέρια. Ο χαρακτηρισμός τους ως κλειστού κύκλου αφορά την επανακυκλοφορία του υγρού στο εσωτερικό τους, χωρίς την πρόσληψη ή την απόρριψη του στη θάλασσα. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με εκείνη των συστημάτων ανοιχτού κύκλου, με τη διαφορά ότι τα απόβλητα που εξέρχονται από τα scrubbers οδηγούνται σε δεξαμενή αποθήκευσης (Hermansson, Hasselton, Moldanova, & Ytreberg, 2021). Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρήσης τους σε όλες τις περιοχές, χωρίς κάποιον περιορισμό. Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνονται η πιο σύνθετη διάταξη των εγκαταστάσεών τους και η ανάγκη για ανεφοδιασμό των πλοίων με διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, ενός ισχυρά αλκαλικού διαλύματος. Συστήματα καθαρισμού κλειστού κύκλου διαθέτει μόλις το 2% του παγκόσμιου στόλου (Martinez-Lopez, Marrero, Martin-Cruz, & Miguez Gonzalez, 2022).



Εικόνα 31: Σύστημα καθαρισμού καυσαερίων κλειστού κύκλου (closed loop system)

Υβριδικά συστήματα

Η τελευταία κατηγορία μηχανημάτων καθαρισμού καυσαερίων είναι τα **υβριδικά συστήματα** (hybrid scrubbers). Τα μηχανήματα αυτά μπορούν να συνδυάσουν και τις δύο λειτουργίες, δηλαδή του ανοιχτού και του κλειστού κύκλου, όποτε είναι αναγκαίο. Συγκεκριμένα, στην ανοιχτή θάλασσα μπορεί να τίθεται σε λειτουργία το σύστημα ανοιχτού κύκλου, απορροφώντας θαλασσινό νερό, ενώ στις περιοχές που απαγορεύονται τα open loop scrubbers, μπορούν να μετατρέπονται σε κλειστού κύκλου. Θεωρείται ότι το 16.72% του παγκόσμιου στόλου φέρει υβριδικά συστήματα (Martinez-Lopez, Marrero, Martin-Cruz, & Miguez Gonzalez, 2022). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα υβριδικά συστήματα έχουν πιο περίπλοκες εγκαταστάσεις συγκριτικά με τα άλλα δύο είδη, αν και είναι πιο οικονομικά από τα μηχανήματα κλειστού κύκλου (Fan, Gu, & Luo, 2020).



Εικόνα 32: Υβριδικό σύστημα καθαρισμού καυσαερίων (hybrid scrubber)

3.1.3 Βασικά στοιχεία των συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων

Τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων που χρησιμοποιούνται στον ναυτιλιακό τομέα διαθέτουν ορισμένα κύρια εξαρτήματα που είναι παρόμοια, ανεξαρτήτως τύπου scrubber:

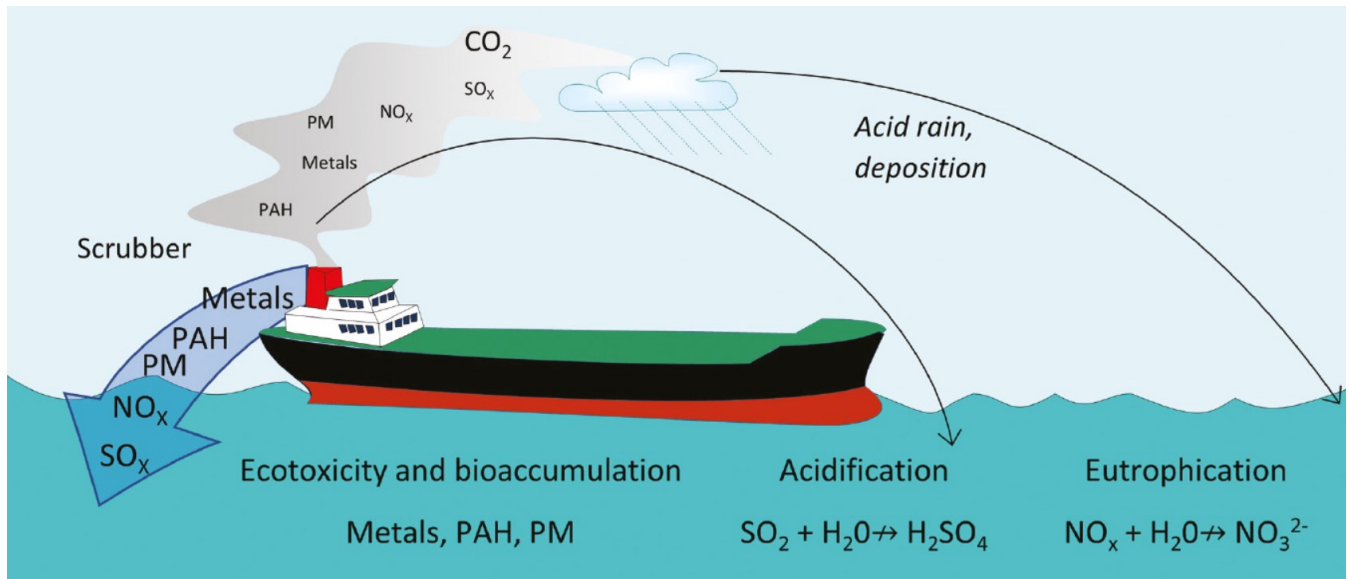
- **Είσοδος καυσαερίων:** Πρόκειται για το σημείο όπου τα καυσαέρια από τις μηχανές του πλοίου εισέρχονται στο σύστημα καθαρισμού και κατευθύνονται προς τον πύργο πλύσης.
- **Πύργος πλύσης:** Αποτελεί το βασικότερο στοιχείο ενός scrubber καθώς εντός του λαμβάνει χώρα η διαδικασία καθαρισμού των καυσαερίων. Διαθέτει ακροφύσια ψεκασμού που διασπείρουν το θαλασσινό νερό ή το αλκαλικό διάλυμα στους αέριους ρύπους του κινητήρα. Επιπλέον, περιέχει ειδικές κλίνες, δηλαδή στρώματα από πλαστικό υλικό, διαφόρων σχημάτων που ενισχύουν την επαφή υγρού – σωματιδίων. Τέλος, φέρει εξαρτήματα συγκράτησης της υγρασίας από το ρεύμα αέρα που εξέρχεται από το σύστημα. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται συνήθως συστοιχίες συρματοπλέγματος.

- **Δεξαμενή διαλύματος πλύσης:** Εντός της δεξαμενής αυτής αποθηκεύεται το αλκαλικό διάλυμα που ψεκάζεται στα καυσαέρια κατά τη διέλευση τους από τον πύργο πλύσης. Μπορεί να περιέχει θαλασσινό νερό ή αλκαλικό διάλυμα.
- **Έξοδος καυσαερίων:** Πρόκειται για το σημείο από το οποίο εξέρχονται τα καθαρισμένα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα.
- **Συστήματα παρακολούθησης:** Τα μηχανήματα καθαρισμού καυσαερίων διαθέτουν αισθητήρες και συσκευές ελέγχου προκειμένου να παρακολουθούνται και να ρυθμίζονται σημαντικές παράμετροι, όπως ο ρυθμός ροής των καυσαερίων εντός του πύργου πλύσης, το επίπεδο pH και η θερμοκρασία του διαλύματος πλύσης. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος και η αποτελεσματική απομάκρυνση των αέριων ρύπων.
- **Συστήματα χειρισμού αποβλήτων:** Το υγρό που προκύπτει από την απόπλυση των καυσαερίων συγκεντρώνεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης. Στη συνέχεια, ανάλογα με τη διαμόρφωση του συστήματος καθαρισμού, τα απόβλητα μπορεί να υποβληθούν σε πρόσθετη επεξεργασία, όπως είναι η εξουδετέρωση, η ρύθμιση του pH καθώς και η προσθήκη χημικών για τη μείωση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Με τη βοήθεια ειδικών συστημάτων ελέγχου, αξιολογείται η κατάσταση τους προκειμένου να διασφαλιστεί ότι μπορούν να διαχειριστούν με ασφάλεια. Οι μέθοδοι διάθεσης των αποβλήτων περιλαμβάνουν την απόρριψη τους στη θάλασσα ή την εκφόρτωση τους σε κατάλληλες εγκαταστάσεις διαχείρισης.

3.1.4 Προβληματισμοί σχετικά με την χρήση scrubbers

Η εγκατάσταση των συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers) στα πλοία σημειώνει ιδιαίτερη άνοδο τα τελευταία χρόνια, στο πλαίσιο συμμόρφωσης των εταιρειών με τη νομοθεσία IMO 2020. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση τους στο θαλάσσιο περιβάλλον εγκυμονεί κινδύνους που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη ώστε να εφαρμοστούν και τα κατάλληλα μέτρα πρόληψης. Αναλυτικότερα, τα μηχανήματα ανοιχτού κύκλου (open loop), τα οποία επιλέγονται συνήθως, χαρακτηρίζονται από την απόρριψη του νερού απόπλυσης των καυσαερίων στη θάλασσα. Τα υγρά απόβλητα είναι ιδιαίτερα όξινα με τιμή pH κοντά στο 3 και χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα βαρέων μετάλλων (ψευδάργυρος, βανάδιο, νικέλιο χαλκός) και οργανικών ενώσεων (πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες) (Teuchies, Cox, Itterbeeck, Meysman, & Blust, 2020). Τα βαρέα μέταλλα καταναλώνονται από τους υδρόβιους οργανισμούς, απειλώντας την ανάπτυξη και τη δυνατότητα αναπαραγωγής τους εξαιτίας της τοξικότητάς τους σε υψηλές

συγκεντρώσεις. Εκτός αυτού, οι συγκεκριμένες ουσίες δεν μπορούν να διασπαστούν περαιτέρω με συνέπεια να συσσωρεύονται στους θαλάσσιους οργανισμούς και μέσω της τροφικής αλυσίδας να απειλούν τον άνθρωπο (Jin, et al., 2021). Όσον αφορά τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, είναι γνωστή η τοξικότητά τους για τους οργανισμούς, μιας και θεωρούνται υπεύθυνοι ακόμα και για την ανάπτυξη καρκινικών κυττάρων (Huang & Penning, 2014). Εκτός των παραπάνω, η χρήση των συστημάτων καθαρισμού των καυσαερίων θέτει σε κίνδυνο τα θαλάσσια οικοσυστήματα καθώς ενισχύει το φαινόμενο του ευτροφισμού (Hasselon, 2022). Ειδικότερα, έχουν εντοπιστεί αυξημένες συγκεντρώσεις αζωτούχων ενώσεων στο υγρό απορροής των scrubbers, οι οποίες αποδίδουν θρεπτικά συστατικά στο φυτοπλαγκτόν και τα υδρόβια φυτά, οδηγώντας στην ανεξέλεγκτη ανάπτυξη τους. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του διαλυμένου οξυγόνου και την επικράτηση αναερόβιων συνθηκών, επιφέροντας την αλλοίωση της βιοποικιλότητας του οικοσυστήματος (Χαραλάμπους, 2007).



Εικόνα 33: Προβληματισμός σχετικά με την περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλείται από τα συστήματα ανοιχτού κύκλου στα θαλάσσια οικοσυστήματα

Μάλιστα, οι αρμόδιες αρχές διάφορων λιμανιών παγκοσμίως έχουν αρχίσει να θέτουν αυστηρούς περιορισμούς στην χρήση **συστημάτων καθαρισμού ανοιχτού κύκλου**, προκειμένου να διασφαλίσουν τα τοπικά, υδάτινα οικοσυστήματα. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται ορισμένες από τις σημαντικότερες τοποθεσίες:

Πίνακας 7: Τοποθεσίες στις οποίες απαγορεύεται η χρήση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων ανοιχτού κύκλου

Τοποθεσία	Περιορισμός
Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (Μπαχρέιν, Φουτζέιρα, Ντουμπάι)	Απαγορεύεται η απόρριψη αποβλήτων που προκύπτουν από τα open loop scrubbers εντός του λιμένα και στο αγκυροβόλιο
Καναδάς	
Σουέζ – Αίγυπτος	
Τουρκία	
Ισπανία (Αλτζεσίρας, Βαλένθια, Καρταγένα, Χουέλβα)	
Σιγκαπούρη	
Ρουμανία	
Κατάρ	Η απόρριψη αποβλήτων είναι εφικτή σε απόσταση 3 ναυτικών μιλίων από τις ακτές
Βέλγιο	
Γαλλία	Απαγορεύεται η απόρριψη αποβλήτων σε ποταμούς της ενδοχώρας και στις περιοχές ελέγχου εκπομπής καυσαερίων
Κίνα	

Ένας ακόμα προβληματισμός αναφορικά με την χρήση των συστημάτων scrubbers σχετίζεται με την επιβράδυνση της μετάβασης σε καύσιμα φιλικότερα προς το περιβάλλον. Αναλυτικότερα, τα τελευταία χρόνια έχουν τεθεί προς μελέτη νέες προτάσεις αναφορικά με την πρόωση των πλοίων, έχοντας ως γνώμονα την εκπομπή λιγότερο βλαβερών ουσιών για τον πλανήτη. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η παραγωγή καυσίμων χαμηλότερης περιεκτικότητας σε θείο που σημειώνει ιδιαίτερη άνοδο τα τελευταία χρόνια (Vedachalam, Baquerizo, & Dalai, 2022). Ωστόσο, η δυνατότητα χρήσης των υπολειμματικών καυσίμων (HFO) που έχουν χαμηλότερο κόστος σε συνδυασμό με την εγκατάσταση των scrubbers, θα μπορούσε να καθυστερήσει την εξέλιξη αυτή. Μάλιστα, δεδομένου ότι το κόστος των συστημάτων καθαρισμού είναι ιδιαίτερα αυξημένο, η απόσβεση τους απαιτεί ένα σημαντικό χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 1 έως 5 χρόνια συνήθως. Ως εκ τούτου, η χρήση άλλου τύπου καυσίμων πέρα από το HFO, δεν αποτελεί οικονομικά αποδοτική επιλογή.

Τέλος, υπάρχουν ορισμένα ακόμα στοιχεία που χρειάζεται να συνυπολογιστούν κατά τη λήψη της απόφασης εγκατάστασης scrubbers στα πλοία. Ειδικότερα, πέρα από το αρχικό κόστος της αγοράς

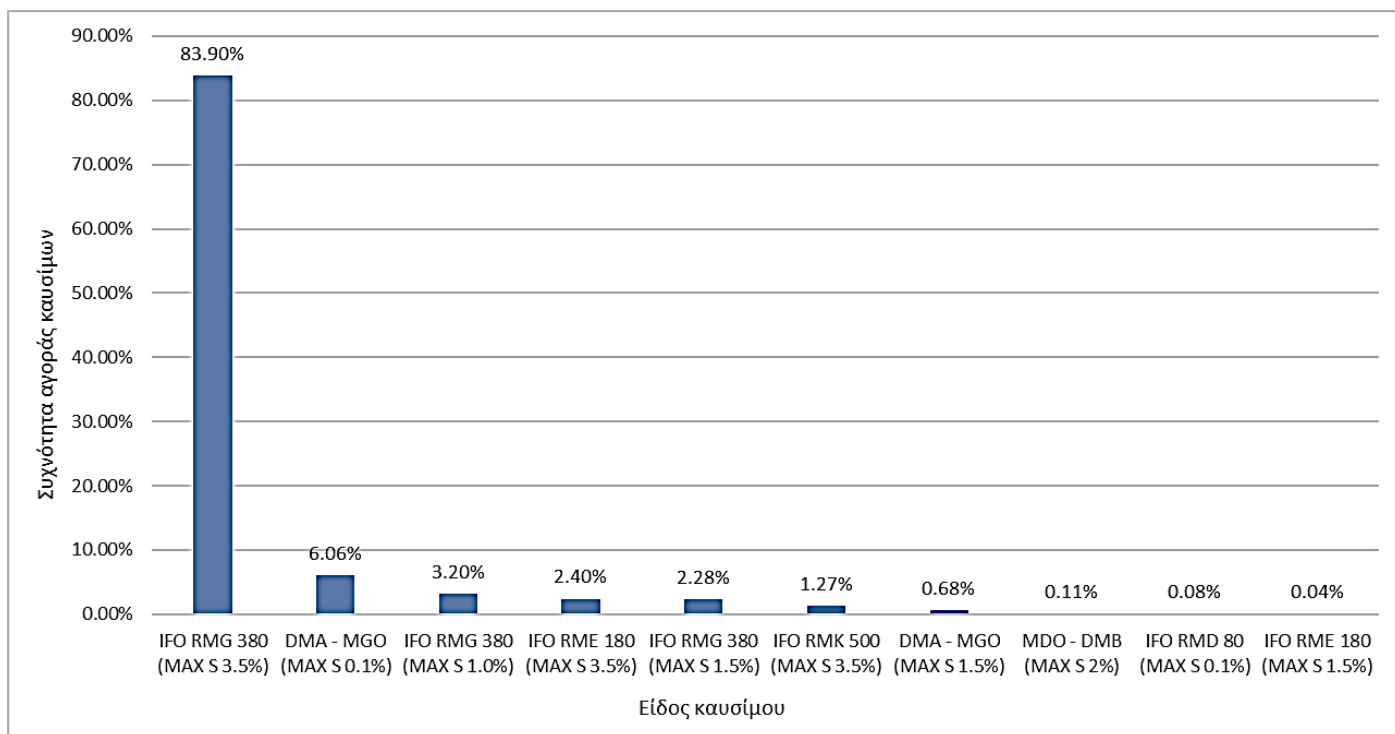
των μονάδων, υπάρχουν διάφορα άλλα έξοδα που σχετίζονται με τη λειτουργία και την συντήρηση τους, τα οποία μπορούν να επιμηκύνουν τον χρόνο απόσβεσης. Παράλληλα, η πολυπλοκότητα των συγκεκριμένων συστημάτων καθιστά απαραίτητη την πρόσληψη επιπλέον ατόμων που θα ασχολούνται με την εγκατάσταση και τη λειτουργία τους. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόφαση αγοράς των scrubbers είναι η συχνότητα με την οποία εισέρχονται τα πλοία στις περιοχές ελέγχου των εκπομπών οξειδίων του θείου (SECA), καθώς και η αυξημένη κατανάλωση καυσίμων στην οποία οδηγεί η λειτουργία τους (Karatug, Arslanoglu, & Soares, 2022).

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Κατά την εκπόνηση της δεδομένης διπλωματικής εργασίας λήφθηκαν δεδομένα από **εταιρεία διαχείρισης πλοίων**, υψηλής δυναμικότητας. Ειδικότερα, τα στοιχεία αυτά αφορούν πραγματικές αγορές καυσίμων που διεξήχθησαν σε διάφορα λιμάνια παγκοσμίως, σε ένα χρονικό διάστημα 14 ετών (2002 - 2016). Στα συγκεκριμένα δεδομένα παρουσιάζεται ο **τύπος των καυσίμων** που αγοράστηκαν, η περιεκτικότητά τους σε **θείο**, καθώς και τα **λιμάνια** στα οποία πραγματοποιήθηκε η πετρέλευση, δίνοντας τη δυνατότητα περαιτέρω ανάλυσης και κατανόησης των τάσεων που επικρατούν στην αγορά. Εκτός αυτού, γίνεται μία αντιστοίχιση της **πορείας** που ακολουθούν τα πλοία ανάλογα με τον **τύπο** και το **μέγεθος** τους. Παράλληλα, παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την **κατανάλωση καυσίμων** ως συνάρτηση του **μεγέθους των πλοίων**, της **κατάστασης τους** (πλεύση, αγκυροβόλιο, δεξαμενισμός) και της **ταχύτητας** τους. Σημειώνεται ότι τα πλοία που θα μελετηθούν διαθέτουν σύστημα καθαρισμού καυσαερίων (scrubber). Ενδιαφέρον έχει ακόμα ο **επιμερισμός της κατανάλωσης καυσίμων** στα σημαντικότερα **μηχανήματα** που βρίσκονται εν πλω, όπως είναι η κύρια κινητήρια μηχανή, η γεννήτρια diesel και ο ατμολέβητας (boiler) σε κατάσταση λειτουργίας και μη των scrubbers.

1.1 Τάσεις στην αγορά καυσίμων

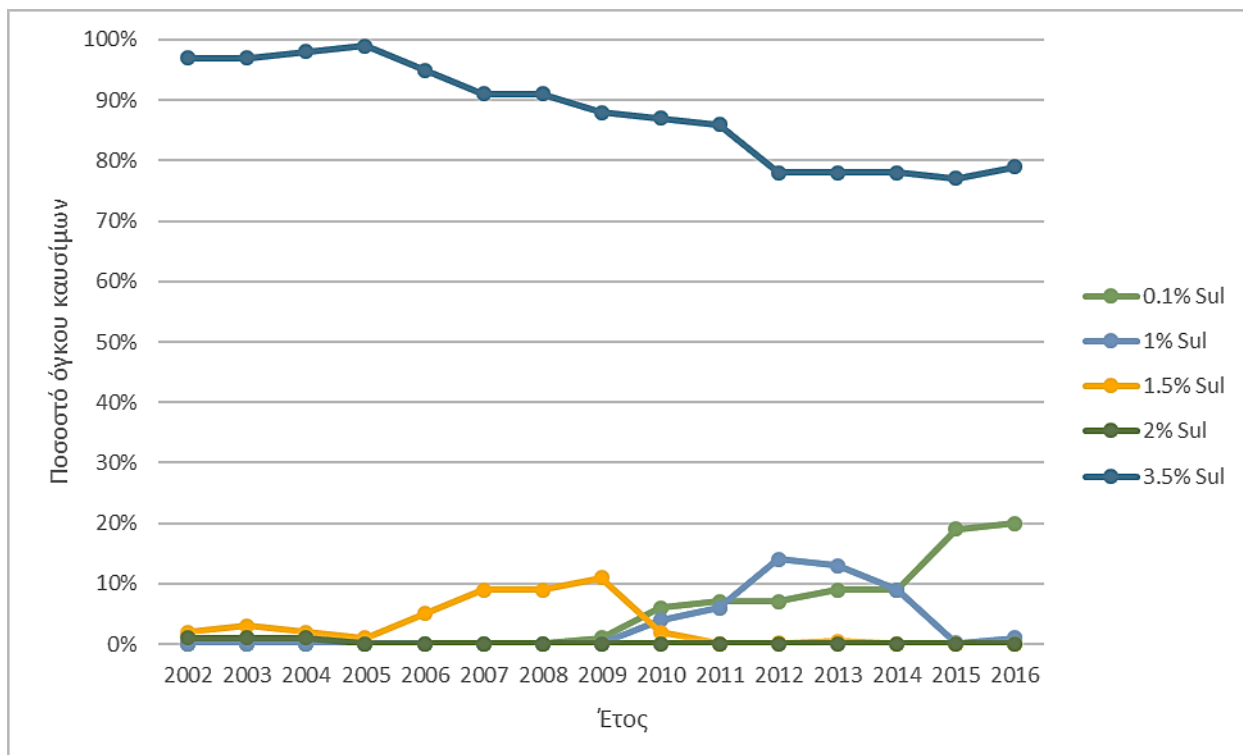
Αρχικά, παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί η συχνότητα αγοράς των καυσίμων με βάση το **είδος** τους σε ένα εύρος **14 ετών**.



Εικόνα 34: Συχνότητα αγοράς καυσίμων με βάση το είδος τους

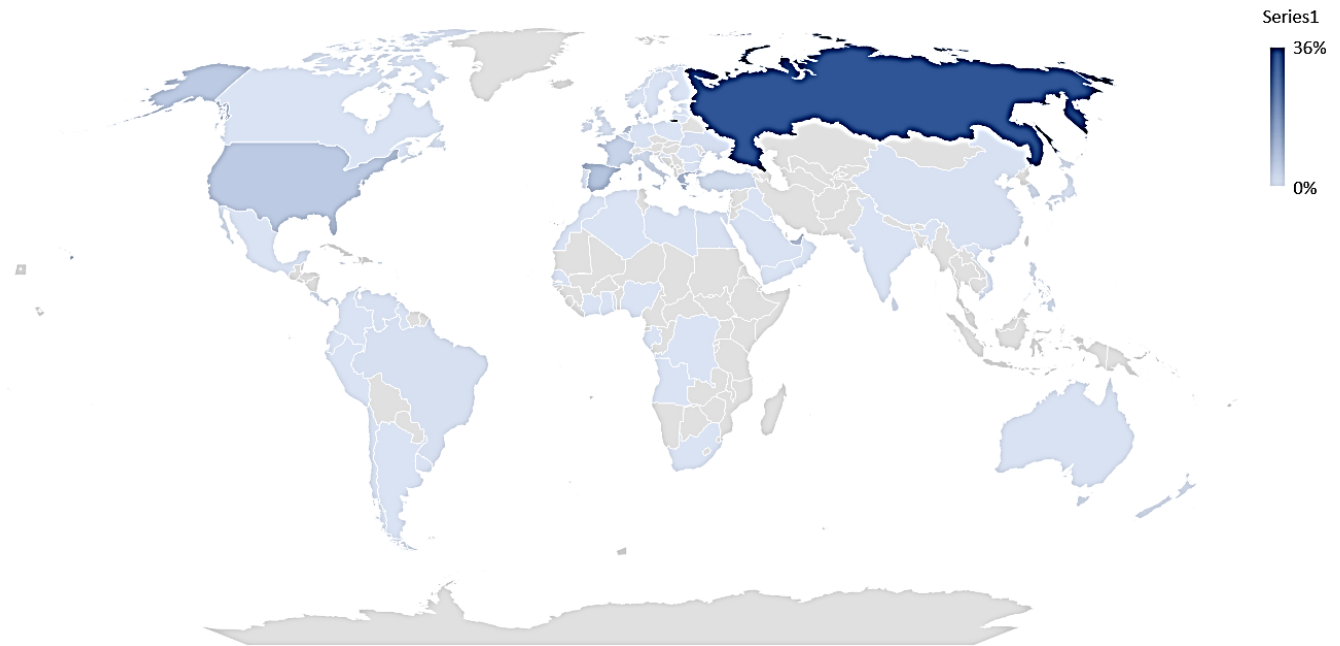
Όπως γίνεται αντιληπτό, το υπολειμματικό, υγρό καύσιμο **IFO RMG 380**, περιεκτικότητας σε θείο 3.5% καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό του όγκου που αγοράστηκε μεταξύ των ετών 2002 - 2016. Ακολουθεί το **DMA – MGO** με συγκέντρωση θείου της τάξης του 0.1%, το οποίο εντάσσεται στην κατηγορία των ελαφριών αποσταγμάτων του αργού πετρελαίου. Τα υπόλοιπα καύσιμα που έχουν αγοραστεί σε πολύ μικρότερα ποσοστά είναι είτε βαριά υπολειμματικά, είτε ελαφριά αποστάγματα του αργού πετρελαίου με τιμή ιξώδους που κυμαίνεται από 80-500 cSt και περιεκτικότητα σε θείο μεταξύ του 0.1-3.5%.

Εμβαθύνοντας στην **συγκέντρωση θείου** στα ναυτιλιακά καύσιμα, σχεδιάζεται το διάγραμμα που ακολουθεί. Εδώ, παρουσιάζεται το ποσοστό του όγκου καυσίμων που αγοράστηκαν το χρονικό διάστημα **2002 – 2016**, για διάφορες τιμές περιεκτικότητας σε θείο. Παρατηρείται ότι με την πάροδο του χρόνου μειώνεται η ζήτηση των καυσίμων που περιέχουν θείο σε ποσοστό 3.5%, ενώ άνοδο σημειώνει η αγορά καυσίμων περιεκτικότητας 0.1% σε θείο.



Εικόνα 35: Ποσοστό όγκου καυσίμων με βάση την περιεκτικότητά τους σε θείο, για αγορές μεταξύ του 2002-2016

Όσον αφορά τις **χώρες** στις οποίες διεξήχθησαν οι αγορές των καυσίμων, έχει δημιουργηθεί ο ακόλουθος χάρτης όπου ανάλογα με την ένταση του χρώματος παρουσιάζει τις τοποθεσίες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι περισσότερες πετρελεύσεις. Υπενθυμίζεται ότι τα συγκεκριμένα δεδομένα αφορούν το χρονικό διάστημα **2002-2016**, συνεπώς δεν είχαν τεθεί ακόμα σε ισχύ περιορισμοί στην Ρωσία εξαιτίας της εισβολής της στο ουκρανικό έδαφος.



Εικόνα 36: Παγκόσμιος χάρτης αναφορικά με τις χώρες στις οποίες πραγματοποιείται η πετρέλευση των πλοίων

Εστιάζοντας στα **λιμάνια** στα οποία λαμβάνει χώρα η πετρέλευση πλοίων πιο τακτικά, προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας που περιλαμβάνει 17 τοποθεσίες:

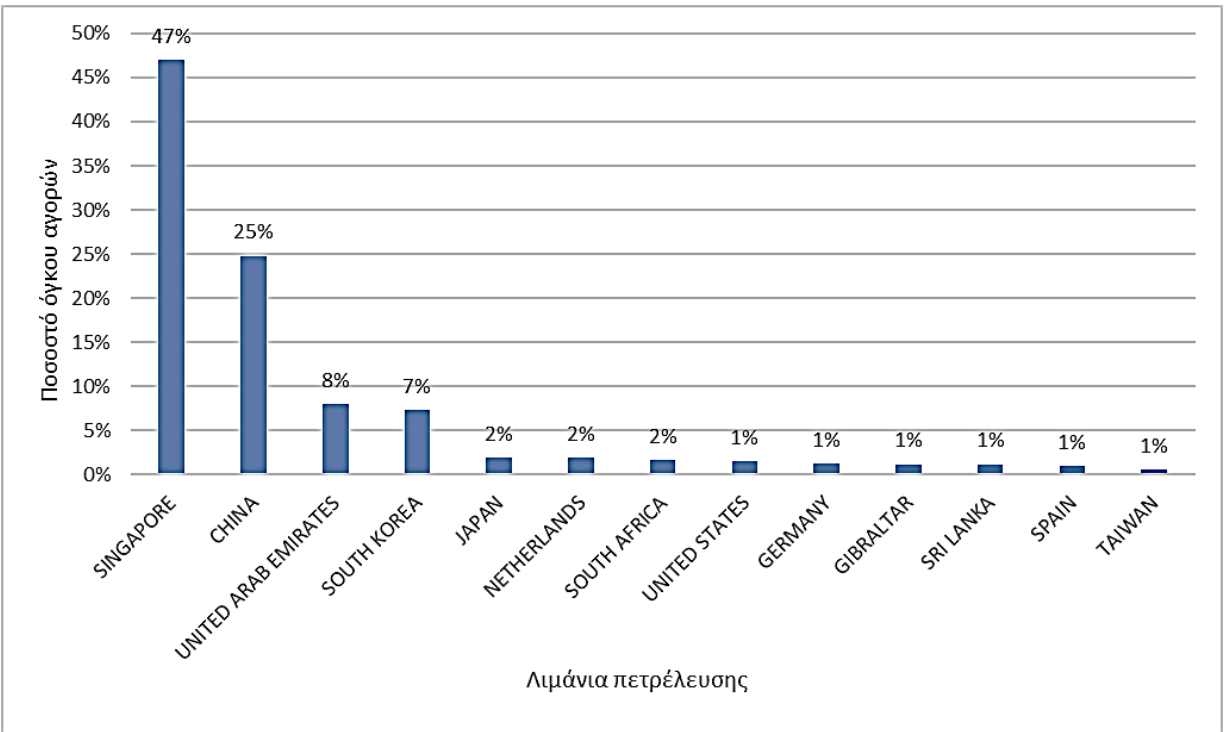
Πίνακας 8: Ποσοστό όγκου παραγγελιών ναυτιλιακών καυσίμων ανά λιμάνι

Λιμάνι	Ποσοστό όγκου παραγγελιών στη δεδομένη τοποθεσία
NOVOROSIYSK	25.93%
SINGAPORE	6.55%
ALGECIRAS	4.89%
FUJAIRAH	4.82%
PIRAEUS	4.17%
ROTTERDAM	3.92%
PRIMORSK	3.29%
QESHM ISLAND	3.24%

TUAPSE	3.06%
FOS	2.38%
KALI LIMENES	1.73%
SKAW	1.56%
MALTA	1.39%
UST-LUGA	1.14%
BOSPORUS	1.11%
LAS PALMAS	1.04%
HOUSTON	1.02%

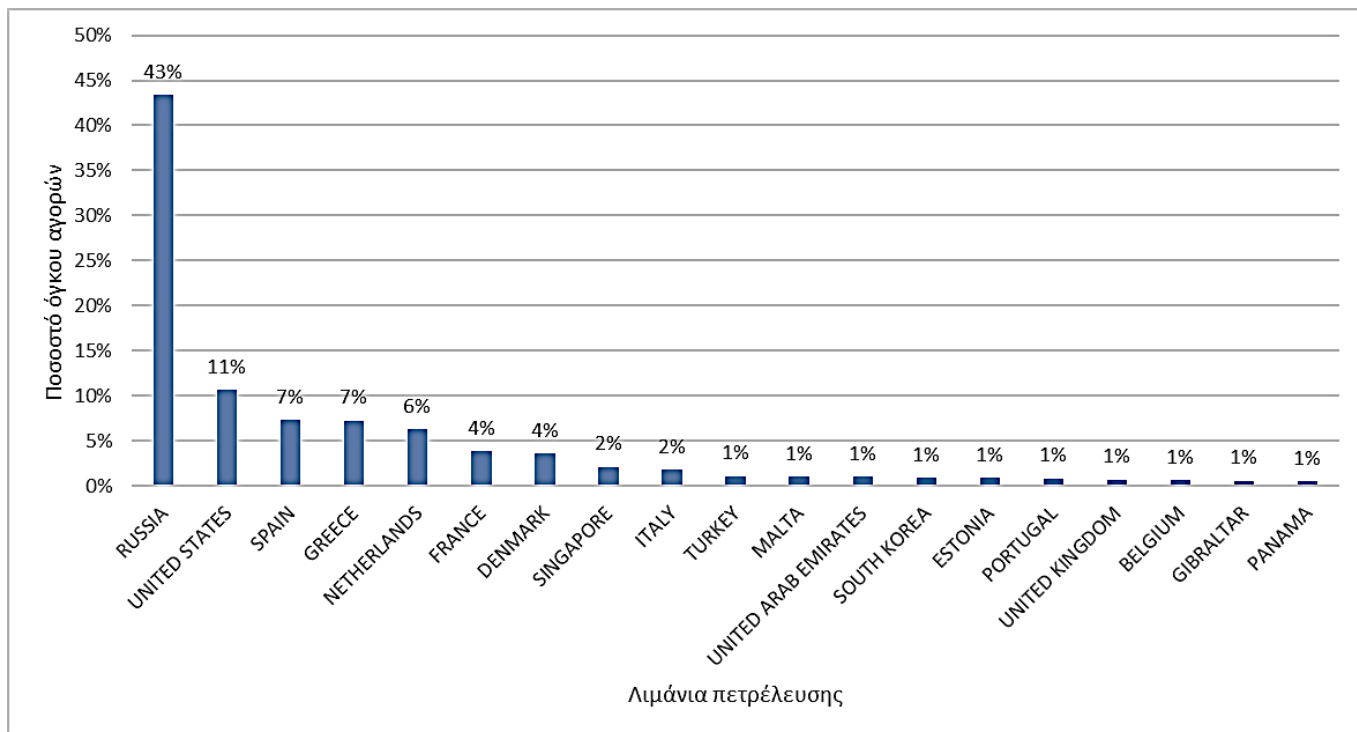
Το πιο τακτικό λιμάνι ανεφοδιασμού ναυτιλιακών καυσίμων είναι το **Νοβοροσίσκ** της Ρωσίας και ακολουθούν με σημαντική διαφορά η **Σιγκαπούρη**, το **Αλτζεσίρας** της Ισπανίας, η **Φουτζέιρα** στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και ο **Πειραιάς**.

Ένα ακόμα στοιχείο που εμφανίζει ενδιαφέρον σχετικά με την επιλογή των σημείων ανεφοδιασμού καυσίμων είναι το πώς διαμορφώνεται με βάση τον **τύπο των πλοίων**. Αναλυτικότερα, στα διαγράμματα που ακολουθούν διακρίνονται τα **λιμάνια** στα οποία αγοράζεται ο μεγαλύτερος όγκος ναυτιλιακών καυσίμων για τις τρεις βασικές κατηγορίες σκαφών: φορτηγά ξηρού φορτίου (dry cargo vessels), δεξαμενόπλοια (crude oil tankers) και υγραεριοφόρα (LNG).



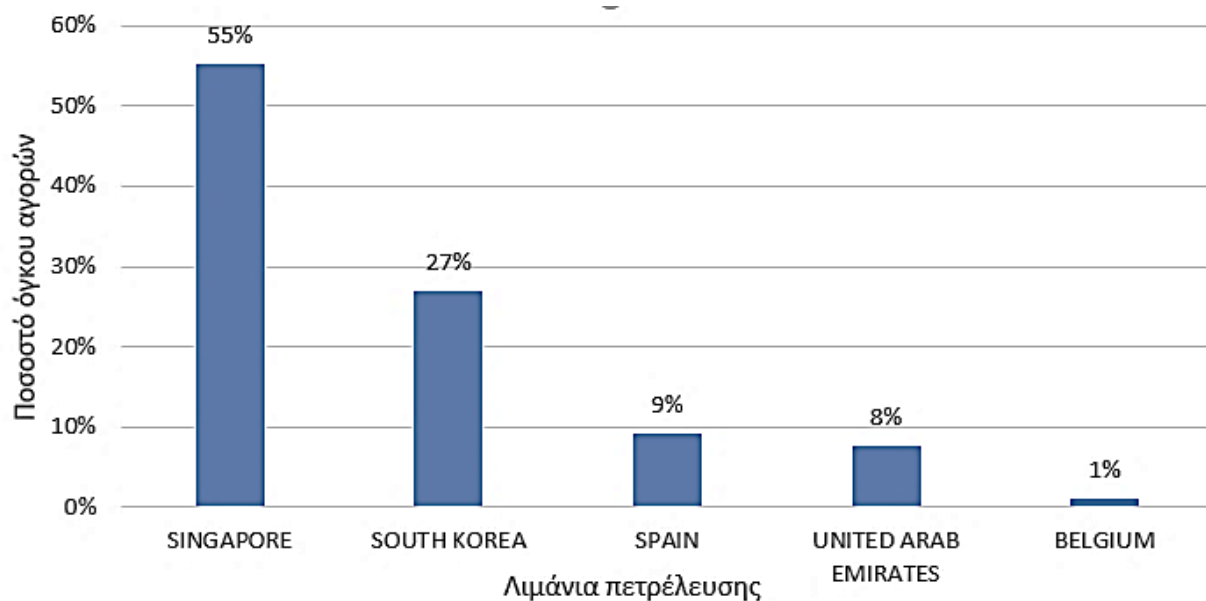
Εικόνα 37: Τα 5 λιμάνια με τον μεγαλύτερο όγκο αγοράς ναυτιλιακών καυσίμων για φορτηγά πλοία ξηρού φορτίου

Η πετρέλευση των **φορτηγών πλοίων ξηρού φορτίου** πραγματοποιείται σε ένα ποσοστό 83% σε ασιατικές χώρες, όπως η Σιγκαπούρη, η Κίνα η Νότια Κορέα και η Ιαπωνία, και 8% στη Μέση Ανατολή. Το υπόλοιπο 9% αφορά λιμάνια της Ευρώπης, της Νοτίου Αφρικής και των Ηνωμένων Πολιτειών σε ποσοστό 1-2% για το καθένα. Το γεγονός αυτό σχετίζεται άμεσα με το μοτίβο που ακολουθούν τα συγκεκριμένα πλοία στα ταξίδια που εκτελούν.



Εικόνα 38: Τα 5 λιμάνια με τον μεγαλύτερο όγκο αγοράς ναυτιλιακών καυσίμων για δεξαμενόπλοια

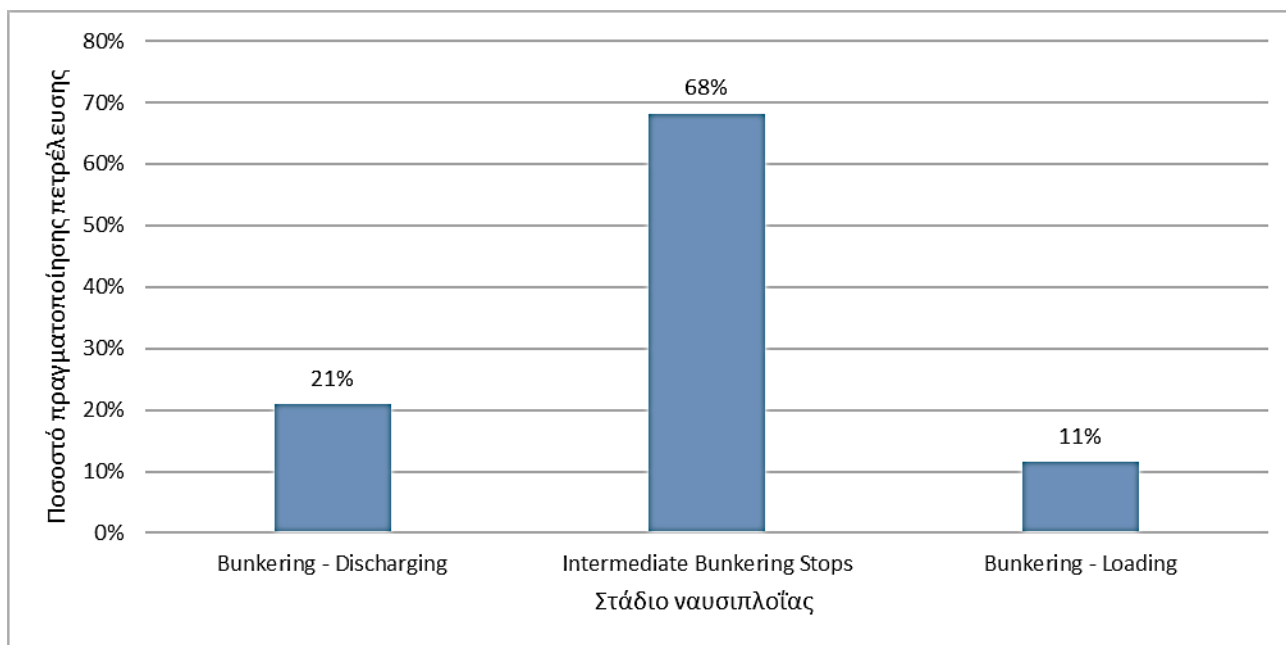
Σε αντίθεση με τα dry cargo vessels, ο ανεφοδιασμός των **δεξαμενόπλοιων** με ναυτιλιακά καύσιμα πραγματοποιείται σε ένα ποσοστό 43% στην Ρωσία, 37% σε ευρωπαϊκές χώρες και 11% στην Αμερική. Το υπόλοιπο 9% αφορά λιμάνια σε ασιατικές χώρες και τη Μέση Ανατολή.



Εικόνα 39: Τα 5 λιμάνια με τον μεγαλύτερο όγκο αγοράς ναυτιλιακών καυσίμων για υγραεριοφόρα

Στα **υγραεριοφόρα πλοία (LNG - LPG)** ο ανεφοδιασμός πραγματοποιείται σε ασιατικές χώρες σε ποσοστό 82%, σε ευρωπαϊκές χώρες στο 10% του όγκου των παραγγελιών και στο 8% σε λιμάνια των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων.

Μία ακόμα χρήσιμη πληροφορία που μπορεί να εξαχθεί από τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί είναι αν ο ανεφοδιασμός των πλοίων με ναυτιλιακά καύσιμα λαμβάνει χώρα κατά το στάδιο της **φόρτωσης ή εκφόρτωσης** του φορτίου ή σε **ενδιάμεσους σταθμούς**. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται με τη μορφή ποσοστών η πληροφορία αυτή, για δεδομένα που αφορούν το χρονικό διάστημα 2012 – 2022:



Εικόνα 40: Ποσοστό ανεφοδιασμού με ναυτιλιακά καύσιμα ανάλογα με το στάδιο του ταξιδιού

Γίνεται αντιληπτό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των πετρελεύσεων πραγματοποιείται σε ενδιάμεσους σταθμούς σε ποσοστό **68%**. Ακολουθεί ο ανεφοδιασμός κατά τη διαδικασία της εκφόρτωσης του φορτίου στο λιμάνι που κυμαίνεται στο **21%**. Αντιθέτως, σε σημαντικά μικρότερο ποσοστό της τάξης του **11%** γίνεται στις τοποθεσίες φόρτωσης των πλοίων.

1.2 Εκτελούμενα δρομολόγια με βάση το είδος των πλοίων

Μία ανάλυση αναφορικά με τα λιμάνια στα οποία φτάνουν τα πλοία αναδεικνύει την πορεία που ακολουθούν αναλόγως του τύπου και του μεγέθους τους. Εστιάζοντας στα μεγαλύτερα σκάφη της κατηγορίας των φορτηγών πλοίων ξηρού τύπου και των δεξαμενόπλοιων, μελετώνται στοιχεία για **1 capesize – dry cargo vessel, 2 suezmax – crude oil tankers και 4 VLCC – crude oil tankers** για ένα διάστημα **10 ετών**, από το 2012 μέχρι το τέλος του 2022.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται ότι το **capsize πλοίο ξηρού φορτίου** ταξιδεύει κυρίως σε ασιατικές χώρες, λιμάνια της Αυστραλίας και της Αφρικής και αρκετά λιγότερο σε ευρωπαϊκές χώρες και στην Αμερική. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε σημαντικό βαθμό σε συμφωνία με τα λιμάνια στα οποία λαμβάνουν ναυτιλιακά καύσιμα τα συγκεκριμένα πλοία, όπως ήταν και αναμενόμενο.

Πίνακας 9: Ποσοστό αφίξεων σε λιμάνια με βάση την γεωγραφική ήπειρο για πλοίο ξηρού φορτίου, μεγέθους capesize

Ήπειρος	Ποσοστό άφιξης
Ασία	63%
Αυστραλία	13%
Αφρική	9%
Ευρώπη	8%
Βόρεια Αμερική	5%
Νότια Αμερική	3%

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα στοιχεία για τα δεξαμενόπλοια που μελετήθηκαν. Η Ασία είναι η πρώτη ήπειρος την οποία επισκέπτονται πιο συχνά, τόσο τα suezmax, όσο και τα VLCC. Ωστόσο, διαφορές εντοπίζονται στα υπόλοιπα ποσοστά, όπου για τα suezmax υψηλές θέσεις καταλαμβάνουν τα λιμάνια της Ευρώπης και της Αφρικής, ενώ αρκετά χαμηλότερα βρίσκονται η Βόρεια και η Νότια Αμερική. Στα VLCC η Αφρική έρχεται δεύτερη στην κατάταξη, ενώ αρκετά χαμηλότερα ακολουθούν η Βόρεια Αμερική, η Ευρώπη και η Νότια Αμερική. Τέλος, οι στάσεις στην Αυστραλία είναι σχεδόν μηδενικές και για τους δύο τύπους δεξαμενόπλοιων.

Πίνακας 10: Ποσοστό αφίξεων σε λιμάνια με βάση την γεωγραφική ήπειρο για δεξαμενόπλοια τύπου suezmax

Ήπειρος	Ποσοστό άφιξης
Ασία	45%
Ευρώπη	30%
Αφρική	15%
Βόρεια Αμερική	5%
Νότια Αμερική	5%
Αυστραλία	0%

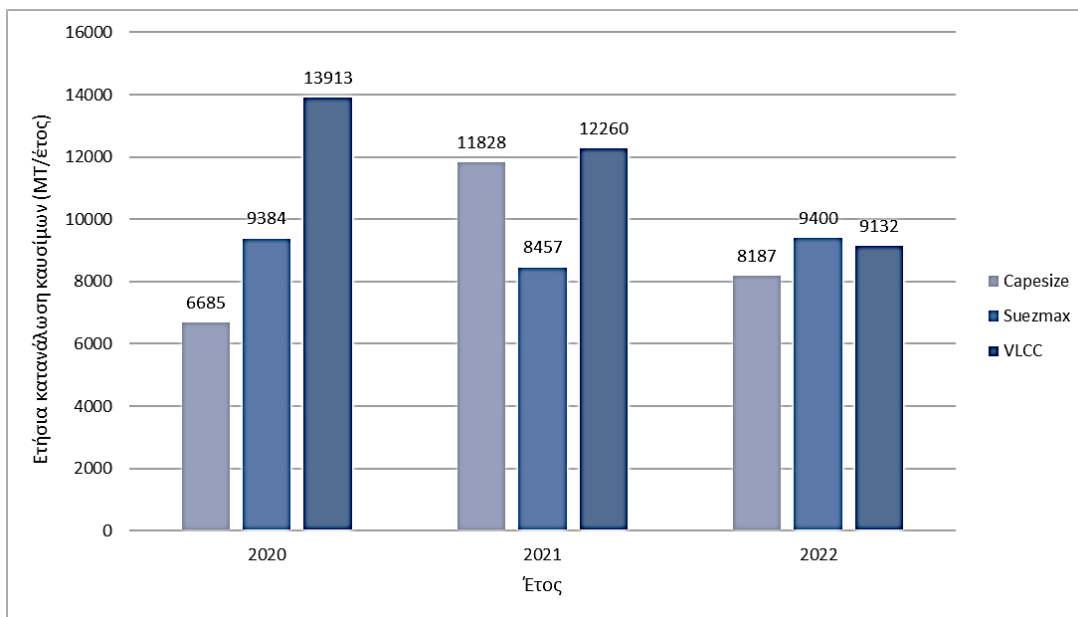
Πίνακας 11: Ποσοστό αφίξεων σε λιμάνια με βάση την γεωγραφική ήπειρο για δεξαμενόπλοια τύπου VLCC

Ήπειρος	Ποσοστό άφιξης
Ασία	70%
Αφρική	19%
Βόρεια Αμερική	5%
Ευρώπη	3%
Νότια Αμερική	3%
Αυστραλία	0%

1.3 Κατανάλωση καυσίμων

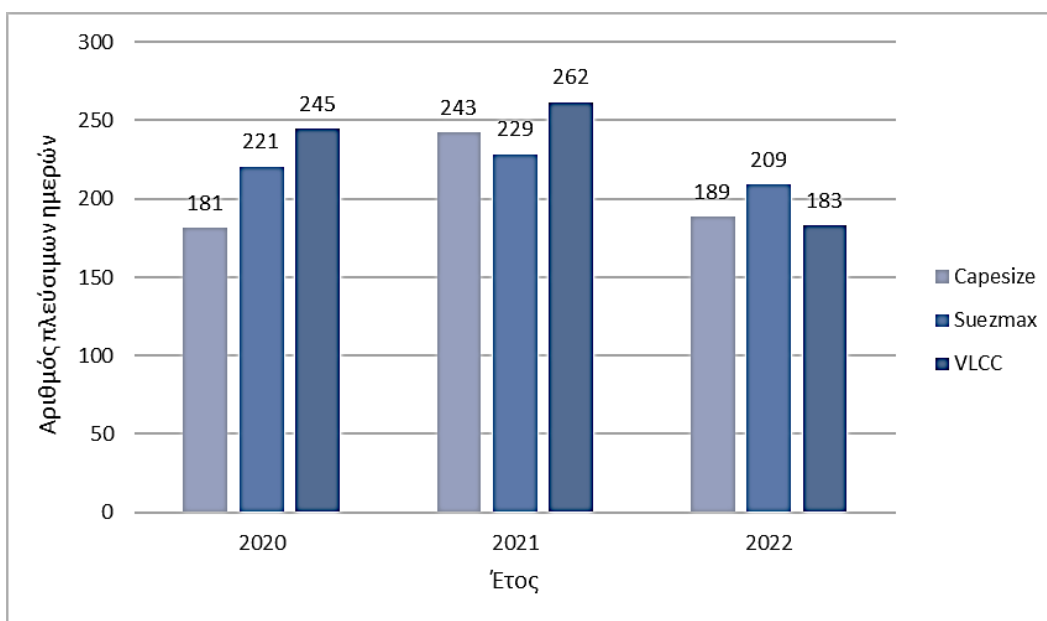
Στη συνέχεια της ανάλυσης των δεδομένων, επιχειρείται ο **συσχετισμός της κατανάλωσης** των καυσίμων με διάφορες παραμέτρους όπως είναι το μέγεθος των πλοίων, η κατάσταση πλεύσης τους και η ταχύτητα τους. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω αφορούν 1 capesize – dry cargo vessel, 2 suezmax – crude oil tankers και 4 VLCC – crude oil tankers για ένα διάστημα 3 ετών , από το 2020 μέχρι το τέλος του 2022. Όλα τα σκάφη που αναφέρθηκαν έχουν εγκατεστημένο σύστημα καθαρισμού καυσαερίων ανοιχτού κύκλου (**open loop system**).

Από τα δεδομένα που διατίθενται, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα που αφορά την ετήσια κατανάλωση καυσίμων. Παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος όγκος καυσίμων καταγράφεται για το **VLCC** τα έτη **2020 – 2021**, ενώ το **2022** βρίσκεται στη δεύτερη θέση μετά το **Suezmax**. Το **Capesize** σημειώνει τη χαμηλότερη κατανάλωση για τα έτη **2020 – 2022**, ωστόσο το **2021** πλησιάζει σημαντικά εκείνη του **VLCC**. Υπενθυμίζεται ότι το μέγεθος ενός VLCC κυμαίνεται από 300,000 έως 320,000 dwt, του Suezmax από 140,000 – 170,000 dwt και του Capesize από 120,000 – 180,000 dwt.



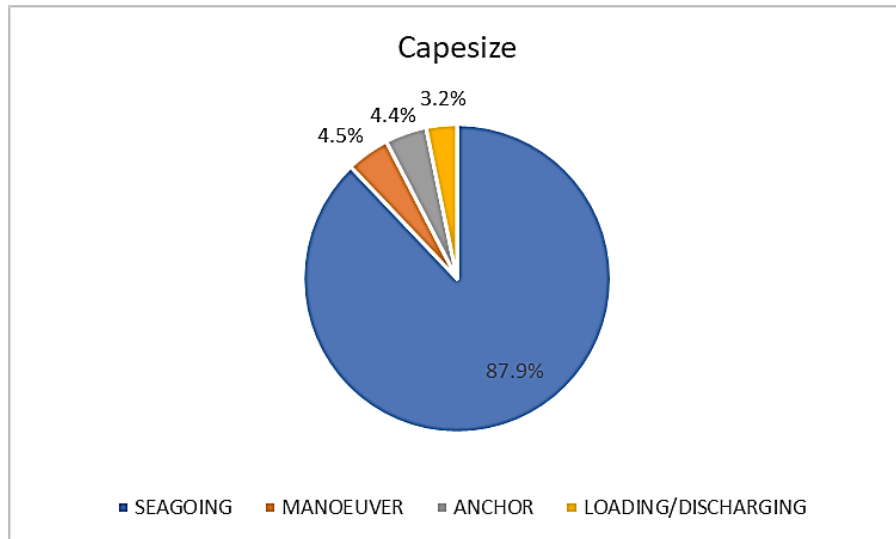
Εικόνα 41: Ετήσια κατανάλωση ναυτιλιακών καυσίμων το χρονικό διάστημα 2020-2022, για πλοία Capesize, Suezmax και VLCC

Το διάγραμμα που ακολουθεί βρίσκεται σε συμφωνία με την παραπάνω εικόνα μιας και παρουσιάζεται ο **αριθμός των πλεύσιμων ημερών** για κάθε πλοίο και έτος. Όπως είναι αναμενόμενο, η υψηλότερη κατανάλωση αντιστοιχεί και στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα πλεύσης.

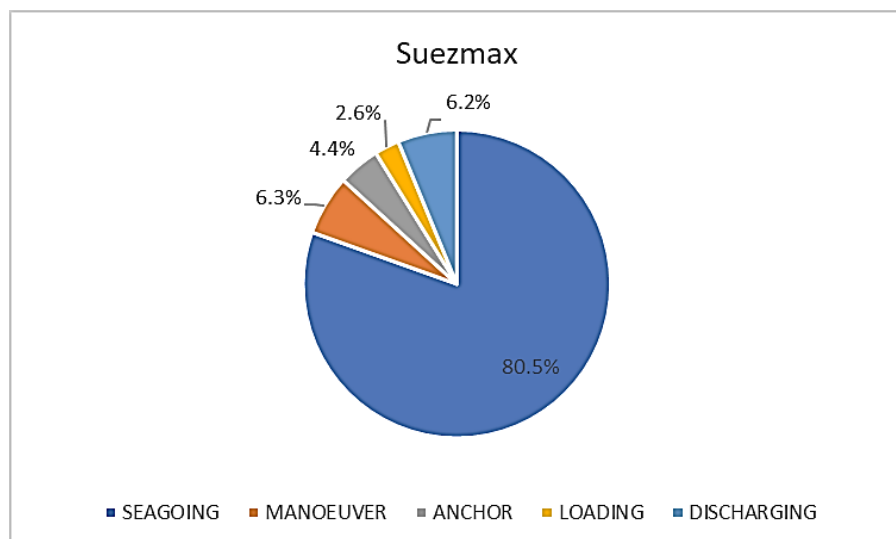


Εικόνα 42: Αριθμός πλεύσιμων ημερών για το χρονικό διάστημα 2020-2022, για πλοία Capesize, Suezmax και VLCC

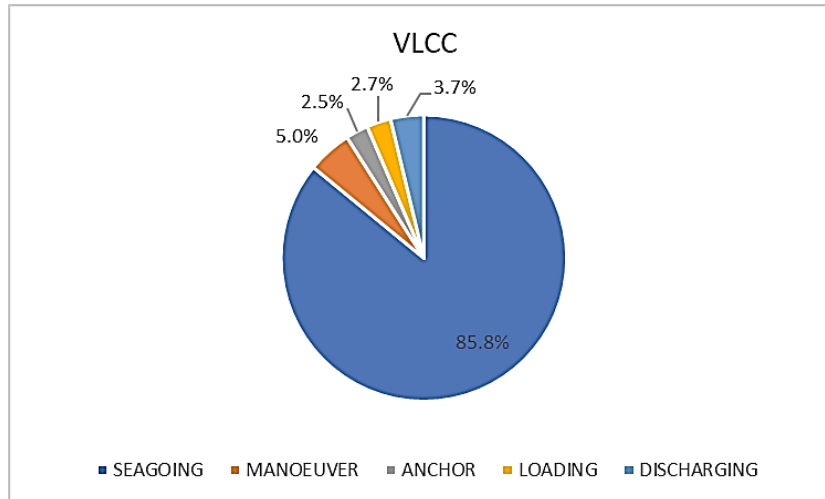
Ένα άλλο διάγραμμα που εμφανίζει ενδιαφέρον είναι το **ποσοστό κατανάλωσης καυσίμων** με βάση την κατάσταση ενός πλοίου, δηλαδή κατά την εκτέλεση κάποιου ταξιδιού (**seagoing**), όταν πραγματοποιεί ελιγμούς κατά την είσοδο – έξοδο από ένα λιμάνι (**manoeuvre**) ή όταν βρίσκεται στο αγκυροβόλιο (**anchor**). Επίσης, παρουσιάζεται το ποσοστό χρήσης καυσίμων κατά το στάδιο φόρτωσης – εκφόρτωσης (**loading – discharging**).



Εικόνα 43: Ποσοστό κατανάλωσης καυσίμων με βάση την κατάσταση ενός πλοίου ξηρού φορτίου, μεγέθους Capesize



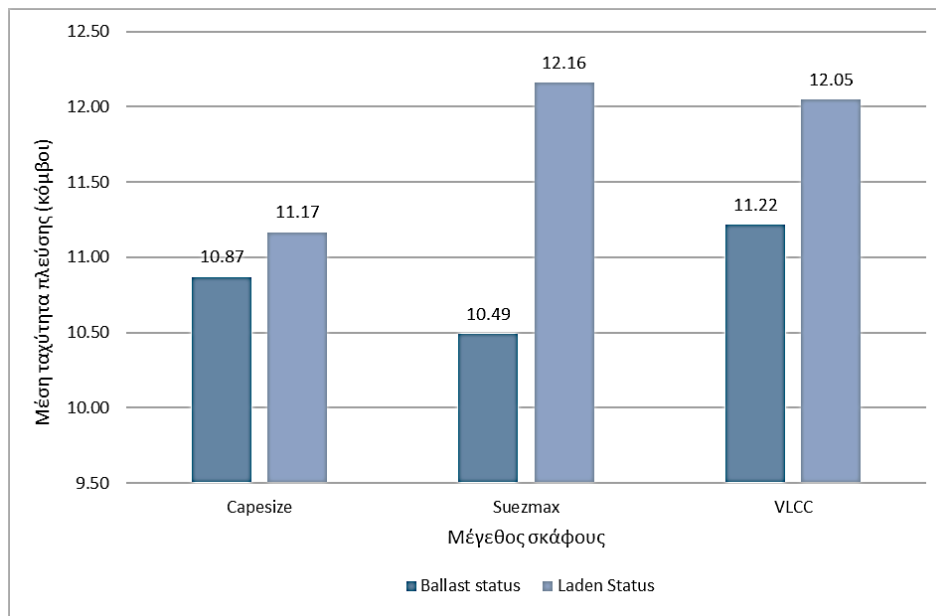
Εικόνα 44: Ποσοστό κατανάλωσης καυσίμων με βάση την κατάσταση ενός δεξαμενόπλοιου, μεγέθους Suezmax



Εικόνα 45: Ποσοστό κατανάλωσης καυσίμων με βάση την κατάσταση ενός δεξαμενόπλοιου, μεγέθους VLCC

Όπως ήταν αναμενόμενο, το μεγαλύτερο ποσοστό καυσίμων καταναλώνεται κατά την εκτέλεση δρομολογίων (seagoing). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στην περίπτωση των δεξαμενόπλοιων απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμων κατά το στάδιο της εκφόρτωσης (discharging) συγκριτικά με τη φόρτωση (loading).

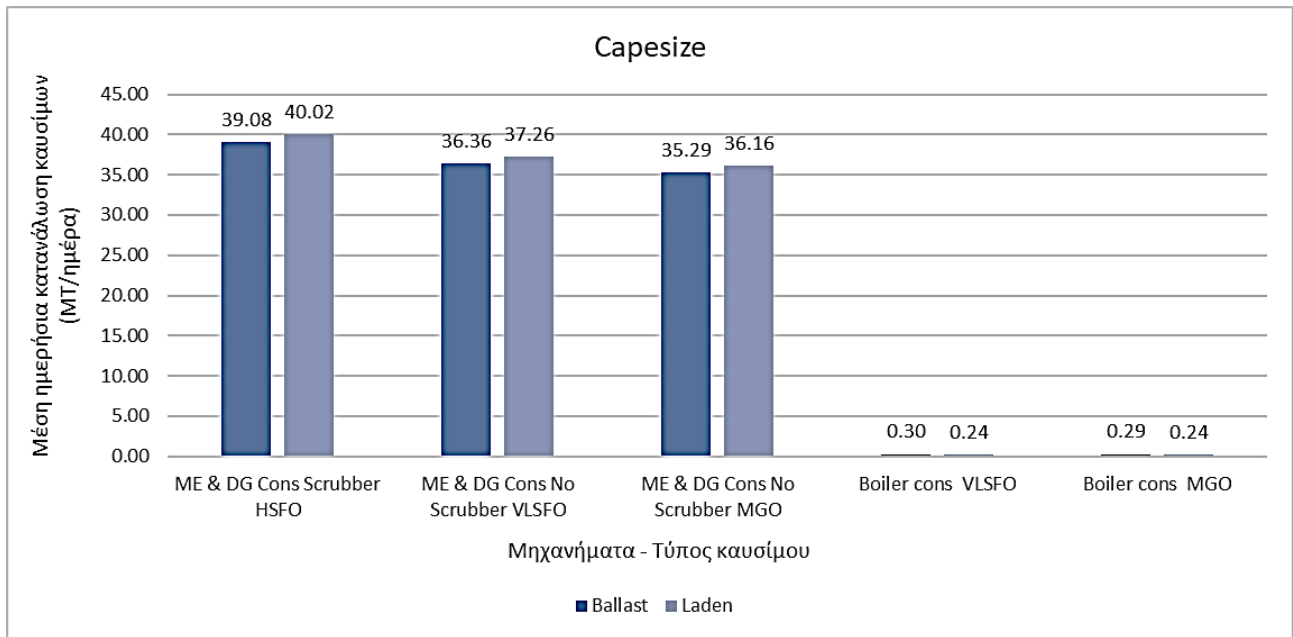
Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζεται η μέση **ταχύτητα πλεύσης** των πλοίων όταν φέρουν φορτίο (laden status), καθώς και όταν είναι αφόρτωτα (ballast status).



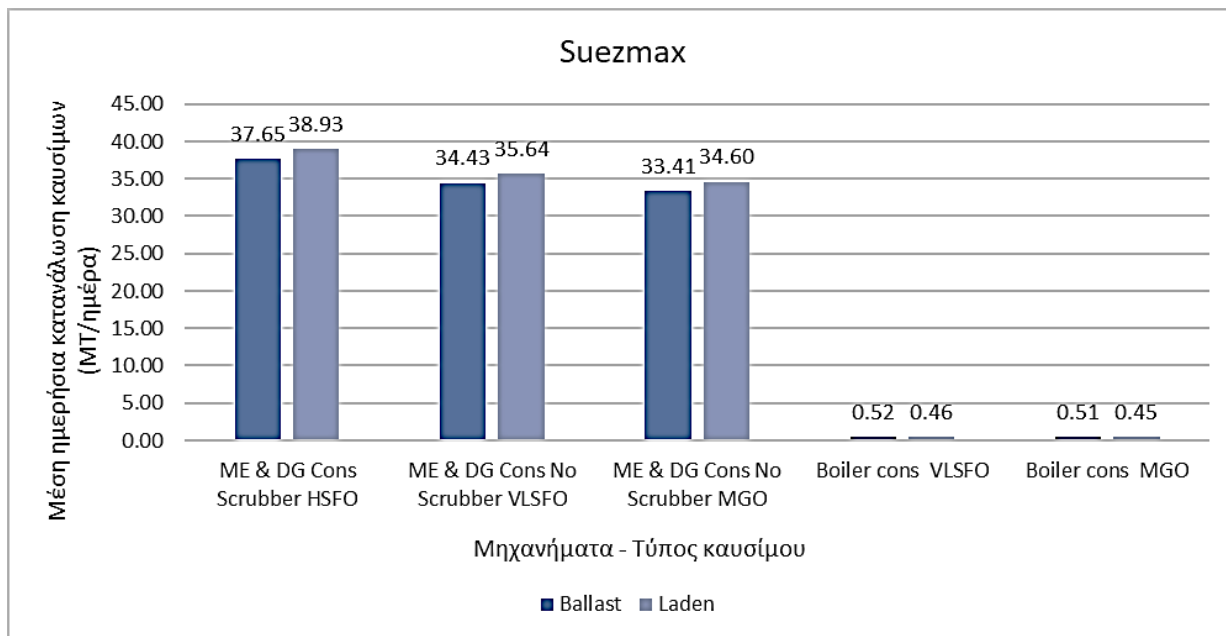
Εικόνα 46: Μέση ταχύτητα πλεύσης με βάση το μέγεθος των πλοίων και την κατάσταση φόρτωσης τους (ballast - laden)

Παρατηρείται μικρή διαφορά μεταξύ των διαφορετικών ειδών πλοίων, μιας και κυμαίνεται από **10.50 – 11.20 κόμβους** περίπου όταν δεν φέρουν φορτίο (ballast status), ενώ βρίσκεται μεταξύ του εύρους **11.20 – 12.15 κόμβων** όταν είναι φορτωμένα (laden status). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφορά με βάση την κατάσταση φόρτωσης του σκάφους, μιας και σημειώνονται υψηλότερες ταχύτητες όταν μεταφέρουν φορτίο.

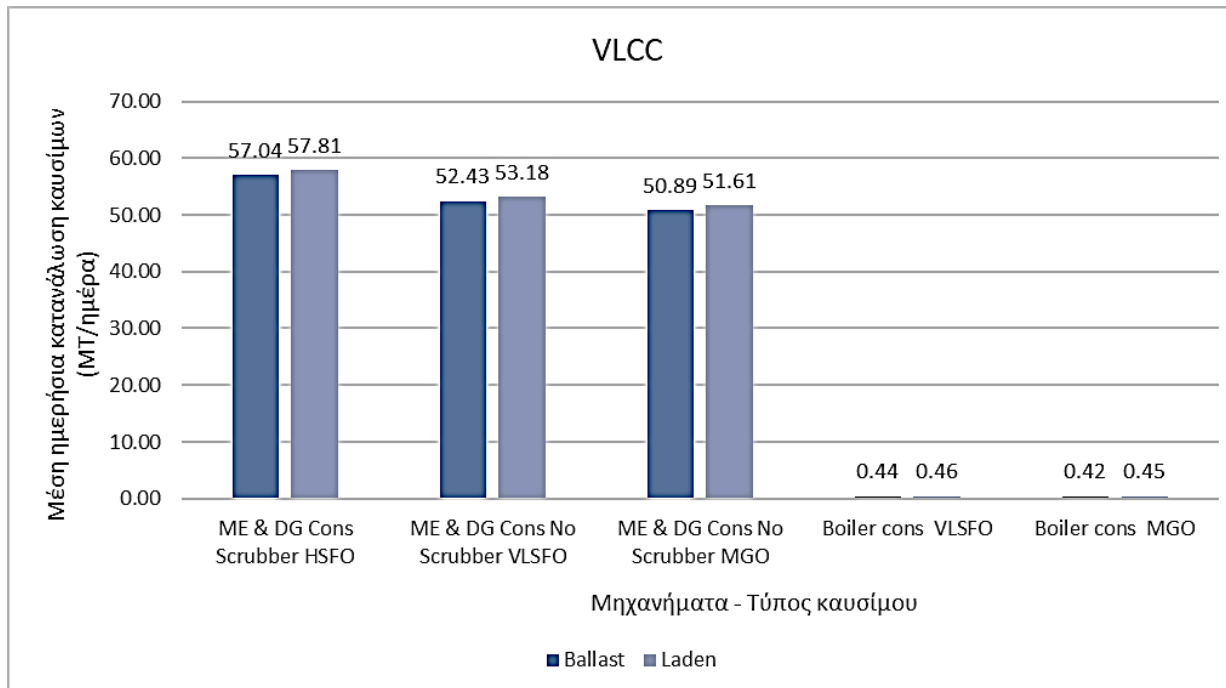
Τέλος, στα παρακάτω διαγράμματα διακρίνεται η μέση **ημερήσια κατανάλωση καυσίμων** για σκάφη μεγέθους capesize, suezmac και VLCC από τα σημαντικότερα μηχανήματα που βρίσκονται εν πλω, όπως είναι η κύρια κινητήρια μηχανή (Main Engine), η γεννήτρια diesel (Diesel Generator) και ο ατμολέβητας (Boiler) σε κατάσταση λειτουργίας και μη των συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων, όταν το πλοίο μεταφέρει (laden status) ή όχι φορτίο (ballast status).



Εικόνα 47: Μέση ημερήσια κατανάλωση καυσίμων από τα σημαντικότερα μηχανήματα εν πλω, ανάλογα με το είδος καυσίμων που χρησιμοποιούν και την κατάσταση φόρτωσης τους (ballast - laden) για ένα πλοίο μεγέθους capesize



Εικόνα 48: Μέση ημερήσια κατανάλωση καυσίμων από τα σημαντικότερα μηχανήματα εν πλω, ανάλογα με το είδος καυσίμων που χρησιμοποιούν και την κατάσταση φόρτωσης τους (ballast - laden) για ένα πλοίο μεγέθους suezmax



Εικόνα 49: Μέση ημερήσια κατανάλωση καυσίμων από τα σημαντικότερα μηχανήματα εν πλω, ανάλογα με το είδος καυσίμων που χρησιμοποιούν και την κατάσταση φόρτωσης τους (ballast - laden) για ένα πλοίο μεγέθους VLCC

Ο μεγαλύτερος όγκος καυσίμων καταναλώνεται από την κύρια μηχανή (ME) και τη γεννήτρια diesel (DG), ενώ πολύ μικρότερη ποσότητα από τον ατμολέβητα (boiler). Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι περισσότερη κατανάλωση σημειώνεται κατά την χρήση των μηχανημάτων scrubbers σε συνδυασμό με βαριά, υπολειμματικά καύσιμα, υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες, όταν τα συστήματα καθαρισμού είναι εκτός λειτουργίας. Μάλιστα, η κατανάλωση μεταβάλλεται ελαφρώς ανάλογα με το είδος καυσίμων που χρησιμοποιεί το πλοίο, παραδείγματος χάρη βαριά υπολειμματικά με πολύ χαμηλή (VLSFO) περιεκτικότητα σε θείο και ελαφριά αποστάγματα (MGO).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

1.1 Τάσεις στην αγορά καυσίμων

Είδος καυσίμων

Από τα [δεδομένα των αγορών](#) σε χρονικό διάστημα 14 ετών, προκύπτει ότι το υπολειμματικό, υγρό καύσιμο **IFO RMG 380** με περιεκτικότητα σε θείο 3.5% διακινείται με μεγαλύτερη συχνότητα, στο ναυτιλιακό κλάδο. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο κόστος του, το οποίο είναι πιο προσιτό συγκριτικά με τα υπόλοιπα καύσιμα που έχουν υποστεί περισσότερη επεξεργασία. Παράλληλα, πρόκειται για ένα καύσιμο ευρέως διαθέσιμο σε πολλά λιμάνια παγκοσμίως, διευκολύνοντας τον σχεδιασμό των διαδρομών που ακολουθούν τα πλοία. Εκτός αυτού, παρουσιάζει συμβατότητα με τις περισσότερες ναυτιλιακές μηχανές πρόωσης, ιδίως τις παλαιότερες και εμφανίζει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Τέλος, το IFO RMG 380 είναι ένα σταθερό καύσιμο που μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς σημαντική υποβάθμιση.

Παρ' όλ' αυτά, η συμμόρφωση των πλοίων με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που τέθηκαν σε ισχύ τα τελευταία χρόνια, έχει διαμορφώσει νέες τάσεις στην αγορά ναυτιλιακών καυσίμων. Με την πάροδο του χρόνου, αρχίζει να αυξάνεται η ζήτηση **καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο**, όπως φαίνεται στο [σχετικό διάγραμμα](#). Η αύξηση αυτή οφείλεται στην εφαρμογή του **IMO 2020**, καθώς και στη θέσπιση περιοχών ελεγχόμενων εκπομπών αερίων (**ECA**). Εκτός αυτού, η αυξανόμενη **ευαισθητοποίηση** σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ναυτιλιακού τομέα, έχει οδηγήσει αρκετές ναυτιλιακές εταιρείες στην υιοθέτηση πιο φιλικών περιβαλλοντικά μεθόδων λειτουργίας. Τέλος, η χρήση καυσίμων χαμηλής συγκέντρωσης θείου ενδέχεται να είναι **πιο αποδοτική** οικονομικά, συγκριτικά με την εγκατάσταση συστημάτων καθαρισμού καυσαερίων για ορισμένους τύπους πλοίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόφαση για

την εγκατάσταση ή μη ενός **μηχανήματος scrubber** εν πλω καθορίζεται από διάφορους **παράγοντες** που παρουσιάζονται επιγραμματικά ακολούθως:

- Τιμές ναυτιλιακών καυσίμων
- Τύπος και έτος κατασκευής πλοίου
- Διαδρομές που ακολουθεί
- Συχνότητα διέλευσης από περιοχές ECA
- Διαθεσιμότητα κεφαλαίου

Λιμάνια ανεφοδιασμού καυσίμων

Όσον αφορά τις τοποθεσίες στις οποίες πραγματοποιείται η πετρέλευση, το μεγαλύτερο ποσοστό των αγορών πραγματοποιήθηκε στο **Νοβοροσίσκ της Ρωσίας**. Ακολουθούν με σημαντική διαφορά η **Σιγκαπούρη**, το **Αλτζεσίρας**, η **Φουτζέιρα** και ο **Πειραιάς**.

Το **Νοβοροσίσκ** παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό αγορών καθώς βρίσκεται σε κομβική θέση στη **Μαύρη θάλασσα**, εξυπηρετώντας πλοία που πρόκειται να κατευθυνθούν προς την Ευρώπη, την Αφρική, την Ασία αλλά και τη Νότια Αμερική. Παράλληλα, η θέση του προσελκύει πλοία που έχουν μόλις ολοκληρώσει τις επισκευές τους (δεξαμενισμός) στα κοντινά ναυπηγεία της Ρουμανίας, της Βουλγαρίας και της Τουρκίας. Εκτός αυτού, χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλία στην παροχή καυσίμων και ανεπτυγμένες υποδομές, εξασφαλίζοντας τον αποτελεσματικό ανεφοδιασμό των πλοίων. Τέλος, το Νοβοροσίσκ παρέχει ανταγωνιστικές τιμές ναυτιλιακών καυσίμων χάρη στη γειτνίαση με πηγές αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου, γεγονός που μειώνει σημαντικά το κόστος μεταφοράς. Σημειώνεται ότι, τα δεδομένα για τις τοποθεσίες που πραγματοποιήθηκαν οι αγορές καυσίμων αφορούν το χρονικό διάστημα **2002 – 2016**, συνεπώς θεωρείται ότι θα υπάρχουν μεταβολές στα ποσοστά που έχουν υπολογιστεί παραπάνω, ειδικά μετά την εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία και την επιβολή κυρώσεων από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Τα υπόλοιπα λιμάνια που έχουν αναφερθεί παραπάνω, παρέχουν και εκείνα σημαντικά πλεονεκτήματα για τον ανεφοδιασμό καυσίμων. Η **Σιγκαπούρη** βρίσκεται σε στρατηγική θέση, εξυπηρετώντας πλοία που ταξιδεύουν μεταξύ του **Ινδικού** και του **Ειρηνικού Ωκεανού**. Αποτελεί έναν από τους πιο πολυσύχναστους κόμβους, μιας και τα φορτία συναλλάσσονται μεταξύ των πλοίων για περαιτέρω διανομή. Το υψηλό επίπεδο ναυτιλιακής δραστηριότητας, λοιπόν, δημιουργεί και αυξημένες ανάγκες πετρέλευσης. Επιπλέον, το λιμάνι της Σιγκαπούρης διαθέτει μεγάλη ποικιλία και διαθεσιμότητα ναυτιλιακών καυσίμων, όπως επίσης και υψηλής ποιότητας εγκαταστάσεις, εξασφαλίζοντας αξιόπιστες και γρήγορες διαδικασίες ανεφοδιασμού. Άλλα στοιχεία που καθιστούν την Σιγκαπούρη μία από τις σημαντικότερες τοποθεσίες για την αγορά ναυτιλιακών καυσίμων είναι οι ανταγωνιστικές τιμές που προσφέρει εξαιτίας της προσέλκυσης πολλών προμηθευτών, καθώς και το γεγονός ότι θεωρείται ζώνη ελεύθερου εμπορίου. Ως εκ

τούτου, η αγορά καυσίμων πραγματοποιείται ταχύτερα, συναντώντας ελάχιστα γραφειοκρατικά κωλύματα. Τέλος, η πολιτική σταθερότητα που επικρατεί στην χώρα συμβάλλει σε ένα ασφαλές περιβάλλον για το ναυτιλιακό κλάδο.

Το **Αλτζεσίρας**, η **Φουτζέιρα** και ο **Πειραιάς** συγκεντρώνουν επίσης υψηλό ποσοστό για τον ανεφοδιασμό καυσίμων για λόγους αντίστοιχους με εκείνους της Σιγκαπούρης. Βρίσκονται και τα τρία λιμάνια σε κομβικά σημεία, διαθέτουν σύγχρονες εγκαταστάσεις, ανταγωνιστικές τιμές καυσίμων και μεγάλη ποικιλία. Όσον αφορά τον **Πειραιά**, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη ότι τα δεδομένα έχουν ληφθεί από ελληνική, ναυτιλιακή εταιρεία, η οποία ενδέχεται να συνδυάζει τον ανεφοδιασμό καυσίμων με άλλες δραστηριότητες που μπορούν να πραγματοποιηθούν στην ελληνική επικράτεια.

Σημεία πετρέλευσης αναλόγως του τύπου των πλοίων

Τα λιμάνια στα οποία λαμβάνει χώρα ο ανεφοδιασμός καυσίμων διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο των σκαφών. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με τις διαδρομές που ακολουθούν και το φορτίο που μεταφέρουν. Ειδικότερα, τα **φορτηγά πλοία ξηρού φορτίου** λαμβάνουν ναυτιλιακά καύσιμα σε ένα ποσοστό **83%** από **ασιατικές χώρες** και **8%** από τη **Μέση Ανατολή**. Τα συγκεκριμένα σκάφη μεταφέρουν φορτία όπως δημητριακά, λιπάσματα, σιδηρομεταλλεύματα και άνθρακα, κυρίως μεταξύ Αυστραλίας – Ασίας – Νότιας Αμερικής. Επιπλέον, συνηθισμένα είναι τα δρομολόγια προς Αφρική, καθώς και μεταξύ των χωρών της Νοτιοανατολικής Ασίας και της Ινδίας. Τα ταξίδια προς την Ευρώπη είναι σχετικά περιορισμένα, για το λόγο αυτό άλλωστε είναι και τόσο χαμηλό το ποσοστό πετρέλευσης εκεί. Ο ανεφοδιασμός των **δεξαμενόπλοιων** πραγματοποιείται σε ένα ποσοστό **43%** στη **Ρωσία**, **37%** σε **ευρωπαϊκές χώρες** και **11%** στην **Αμερική**. Τα συγκεκριμένα πλοία μεταφέρουν κυρίως ακατέργαστο πετρέλαιο, από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες προς τα διυλιστήρια, καθώς και χημικά προϊόντα. Συνεπώς, συνηθισμένες διαδρομές που ακολουθούν είναι μεταξύ Ρωσίας – Ευρώπης – Ασίας, Νότιας Αμερικής – Ευρώπης και Μέσης Ανατολής – Ασίας. Τέλος, στα **υγραεριοφόρα πλοία (LNG – LPG)**, ο ανεφοδιασμός πραγματοποιείται κατά **82%** σε **ασιατικές χώρες**, **10%** σε **ευρωπαϊκές χώρες** και **8%** σε λιμάνια των **Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων**. Τα συγκεκριμένα πλοία κατευθύνονται από μέρη που διαθέτουν πηγές φυσικού αερίου προς χώρες που η ζήτηση είναι αυξημένη. Οι πιο συνηθισμένες διαδρομές που εκτελούν τα υγραεριοφόρα είναι από την Αυστραλία ή από τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα προς την Ασία. Παράλληλα, τακτικά είναι τα δρομολόγια από την Ρωσία ή την Αμερική προς την Ευρώπη.

Ανεφοδιασμός καυσίμων κατά την φόρτωση / εκφόρτωση του πλοίου

Μία πρόσθετη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τα δεδομένα που διατέθηκαν αφορούσε το στάδιο λήψης των ναυτιλιακών καυσίμων. Ειδικότερα, προέκυψε ότι σε ένα ποσοστό **68%**, η

πετρέλευση έγινε σε ενδιάμεσους σταθμούς της διαδρομής που ακολούθησαν τα σκάφη κατά το χρονικό διάστημα **2012 – 2022**. Σε ποσοστό **21%** πραγματοποιήθηκαν στο λιμάνι εκφόρτωσης, ενώ μόλις κατά **11%** πραγματοποιήθηκαν στο λιμάνι φόρτωσης. Από τη βιβλιογραφία φαίνεται ότι δεν υπάρχει μία συγκεκριμένη πρακτική που προτείνεται να ακολουθηθεί για το στάδιο ανεφοδιασμού, καθώς για όλες τις επιλογές υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η πετρέλευση στο **λιμάνι φόρτωσης** μπορεί να διευκολύνει τον σχεδιασμό ενός μακρινού ταξιδιού, διασφαλίζοντας ότι το πλοίο έχει λάβει την απαραίτητη ποσότητα καυσίμων, χωρίς την ανάγκη για ενδιάμεσους σταθμούς. Ο ανεφοδιασμός στο **λιμάνι εκφόρτωσης** είναι μία άλλη πρακτική, η οποία παρέχει ευελιξία στις ναυτιλιακές εταιρείες, ειδικά όσον αφορά το πρόγραμμα του σκάφους καθώς δεν υπάρχει ο κίνδυνος καθυστερήσεων. Τέλος, η αγορά καυσίμων σε **ενδιάμεσους σταθμούς** μπορεί να επιφέρει μείωση του κόστους, ειδικά όταν αυτές οι στάσεις έχουν προγραμματιστεί εσκεμμένα. Ωστόσο, όλες οι παραπάνω περιπτώσεις ενέχουν δυσκολίες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η πολυπλοκότητα συντονισμού της πετρέλευσης κατά τα στάδια φόρτωσης – εκφόρτωσης ενός πλοίου, οι ενδεχόμενες καθυστερήσεις λόγω της συμφόρησης των λιμανιών, το κόστος και η ποιότητα των καυσίμων στις διάφορες τοποθεσίες. Για αυτόν το λόγο είναι απαραίτητος ο σωστός υπολογισμός των ποσοτήτων που θα χρειαστούν τα σκάφη, λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω παράγοντες:

- Απόσταση που πρόκειται να διανύσει το πλοίο
- Εποχή που πραγματοποιείται το ταξίδι
- Ταχύτητα πλεύσης
- Λιμάνια ή περιοχές με συγκεκριμένους περιορισμούς σχετικά με τις εκπομπές αέριων ρύπων
- Ανάγκη θέρμανσης του φορτίου που μεταφέρεται
- Περιορισμοί που αφορούν την αξιοπλοΐα ενός σκάφους

1.2 Κατανάλωση καυσίμων

Μέγεθος πλοίων – Αριθμός πλεύσιμων ημερών

Η επεξεργασία των δεδομένων αναφορικά με τον όγκο των ναυτιλιακών καυσίμων που χρειάζονται τα πλοία οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η **κατανάλωση** τους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Ειδικότερα, η χρήση των καυσίμων σε ετήσιο επίπεδο είναι πλήρως συνυφασμένη με τον **αριθμό των πλεύσιμων ημερών** που έχουν καταγραφεί για τα σκάφη, όπως είναι και αναμενόμενο. Οι υψηλότερες καταναλώσεις για τα έτη 2020 και 2021 αντιστοιχούν στα δεξαμενόπλοια τύπου VLCC, τα μεγαλύτερα σκάφη της κατηγορίας τους με μέγεθος μεταξύ 300,000 έως 320,000 dwt. Ωστόσο, το 2022, τα δεξαμενόπλοια τύπου Suezmax καταναλώνουν ελαφρώς περισσότερο, με το μέγεθος τους να βρίσκεται στο εύρος 140,000 έως 170,000 dwt.

Ενδιαφέρον ακόμα παρουσιάζει το γεγονός ότι το 2021, η ποσότητα ναυτιλιακών καυσίμων που χρειάστηκαν τα πλοία ξηρού φορτίου, τύπου Capesize πλησίαζε σημαντικά εκείνη των VLCC. Υπενθυμίζεται ότι το μέγεθος τους είναι 120,000 έως 180,000 dwt. Από τα παραπάνω στοιχεία συμπεραίνεται ότι η κατανάλωση των καυσίμων επηρεάζεται από το **μέγεθος των σκαφών**, χωρίς όμως να αποτελεί τον μοναδικό παράγοντα που τη διαμορφώνει.

Κατάσταση πλεύσης

Η υψηλότερη κατανάλωση ναυτιλιακών καυσίμων σημειώνεται κατά την εκτέλεση διαδρομών στην **ανοιχτή θάλασσα**, όπως είναι και αναμενόμενο, ακολουθεί το στάδιο των ελιγμών, του αγκυροβόλιου και οι διαδικασίες της φόρτωσης / εκφόρτωσης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του **αγκυροβόλιου** πραγματοποιείται από βοηθητικές μηχανές ή γεννήτριες που χρειάζονται καύσιμα για να λειτουργήσουν. Η απαιτούμενη ενέργεια συνδέεται με διάφορα συστήματα που διαθέτουν τα πλοία, όπως ο φωτισμός, ο κλιματισμός, η ψύξη, η πλοήγηση και ο εξοπλισμός επικοινωνίας. Παράλληλα, η διατήρηση της θέσης ενός σκάφους στο αγκυροβόλιο περιλαμβάνει την τοποθέτηση άγκυρας, καθώς και την χρήση του συστήματος πρόωσης του σκάφους για την αντιμετώπιση των δυνάμεων του ανέμου και των ρευμάτων. Καύσιμα καταναλώνονται και κατά τα στάδια της **φόρτωσης / εκφόρτωσης** ενός πλοίου. Ειδικότερα, οι διαδικασίες αυτές απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό, όπως αντλίες και συμπιεστές, καθώς και συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας. Τα τελευταία χρειάζονται σε ορισμένους τύπους φορτίων, όπως το αργό πετρέλαιο και τα χημικά προϊόντα, τα οποία θερμαίνονται προκειμένου να μειωθεί το ιξώδες τους και να διευκολυνθεί η άντληση τους από / προς τις δεξαμενές του πλοίου ή της ξηράς. Εκτός αυτού, η θέρμανση αποτρέπει την στερεοποίηση τους και διασφαλίζει την ποιότητα τους, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο αλλοίωσης ή διαχωρισμού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στα δεξαμενόπλοια υπάρχει ελαφρώς υψηλότερη κατανάλωση καυσίμων κατά το στάδιο της **εκφόρτωσης** συγκριτικά με εκείνο της **φόρτωσης**. Αναλυτικότερα, όταν ένα δεξαμενόπλοιο εκφορτώνει φορτίο, δημιουργείται κενός χώρος στις δεξαμενές του, ο οποίος ενδέχεται να προκαλέσει αναταράξεις, μειώνοντας την ευστάθεια του σκάφους. Ως εκ τούτου, απαιτείται πρόσθετη ισχύς από τον κινητήρα προκειμένου να διατηρηθεί η θέση του και η σταθερότητα του εντός του νερού.

Ταχύτητα πλεύσης

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν τα πλοία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών **10.50 – 11.20 κόμβων** όταν δεν φέρουν φορτίο (ballast status) και στους **11.20 – 12.15 κόμβους** όταν είναι φορτωμένα (laden status). Η μέση ταχύτητα των **δεξαμενόπλοιων** είναι συνήθως στους 12 έως 16 κόμβους και ειδικά για τα **VLCC** μπορεί να ανέρχεται στους 14 – 16 κόμβους. Τα **πλοία ξηρού φορτίου**, μεγέθους **Capesize** ταξιδεύουν συνήθως με ταχύτητες της τάξης των 10 – 15 κόμβων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μικρή απόκλιση

που παρατηρείται με βάση την κατάσταση φόρτωσης του σκάφους, μιας και σημειώνονται **υψηλότερες ταχύτητες** όταν είναι **φορτωμένο**. Αναλυτικότερα, το πρόσθετο βάρος από τη μεταφορά των φορτίων συμβάλλει στην σταθεροποίηση του πλοίου και περιορίζει την επίδραση της θαλασσοταραχής. Παράλληλα, τα συστήματα πρόωσης είναι σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικότερα υπό ένα συγκεκριμένο φορτίο. Εκτός των παραπάνω, όταν ένα σκάφος είναι πλήρως φορτωμένο ταξιδεύει με υψηλότερες ταχύτητες προκειμένου να τηρηθούν τα χρονοδιαγράμματα παράδοσης του φορτίου για τη μεταφορά του οποίου έχει ναυλωθεί.

Κατανάλωση μηχανημάτων

Τα μηχανήματα τα οποία καταναλώνουν την υψηλότερη ποσότητα καυσίμων είναι η κύρια μηχανή πρόωσης του πλοίου (**Main Engine**) και η γεννήτρια diesel (**Diesel Generator**), ενώ ελάχιστη κατανάλωση πραγματοποιείται από τον ατμολέβητα (**Boiler**). Η **κύρια μηχανή** αποτελεί το βασικό μέσο πρόωσης του σκάφους μέσα στο νερό, επομένως χρειάζεται να προσφέρει μεγάλη ισχύ ώστε να υπερνικήσει την υδροδυναμική αντίσταση. Αυτό μεταφράζεται σε σημαντική ποσότητα ενέργειας και κατά συνέπεια καυσίμων. Αντίστοιχα, οι **γεννήτριες** χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να καλύψουν όλες τις ανάγκες του σκάφους όπως ο φωτισμός, ο κλιματισμός, ο εξοπλισμός πλοήγησης κτλ. Όσον αφορά τον **ατμολέβητα**, έχει πολύ μικρότερη κατανάλωση συγκριτικά με τα παραπάνω μηχανήματα, μιας και η κύρια χρήση του είναι η παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού, σκοποί που δεν απαιτούν υψηλή ισχύ. Εκτός αυτού, η διαδικασία παραγωγής θερμικής ενέργειας είναι περισσότερο αποδοτική συγκριτικά με εκείνη για τη μηχανική, το οποίο σημαίνει χαμηλότερες απαιτήσεις σε καύσιμα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η απόκλιση που υπάρχει στην ποσότητα που απαιτείται από τα πλοία ξηρού φορτίου σε σχέση με εκείνη των δεξαμενόπλοιων για τον ατμολέβητα. Αυτό οφείλεται στην φύση των φορτίων που μεταφέρουν καθώς όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως τα υγρά φορτία απαιτούν συνήθως θέρμανση κατά το στάδιο φόρτωσης – εκφόρτωσης, αλλά και κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Ένα στοιχείο ακόμα που χρειάζεται να σχολιαστεί είναι ότι κατά την χρήση των μηχανημάτων **scrubbers** καταναλώνονται περισσότερα καύσιμα σε σχέση με το να βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια την οποία αντλούν από τις γεννήτριες diesel. Εκτιμάται ότι η κατανάλωση ενέργειας από τα scrubbers αντιστοιχεί στο 1 – 4% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμων.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

1.1 Προβλήματα από την χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο

Ένας τρόπος συμμόρφωσης των πλοίων με τους νέους περιβαλλοντικούς περιορισμούς είναι η χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, όπως έχει αναφερθεί στην [σχετική παράγραφο](#). Ωστόσο, το γεγονός αυτό εγείρει προβληματισμούς σχετικά με την συμβατότητα τους με τα καύσιμα υψηλής συγκέντρωσης θείου και τον κίνδυνο πρόκλησης φθοράς στον κινητήρα. Ειδικότερα, προτείνεται η ανάμιξη των σύγχρονων καυσίμων με τα συμβατικά προκειμένου να επιτευχθεί το όριο **0.5%** σε θείο που έχει τεθεί από τον **IMO 2020**. Ωστόσο, οι διαφορετικές χημικές ιδιότητες που έχουν οι δύο κατηγορίες καυσίμων ενδέχεται να οδηγήσουν σε ένα ασταθές μείγμα, με άγνωστες προδιαγραφές ποιότητας και απόδοσης. Ένα από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα είναι ο σχηματισμός ιζημάτων και λάσπης εξαιτίας των ασφατενίων (Smyshlyaeva, Rudko, Kuzmin, & Povaon, 2022). Οι συγκεκριμένες ουσίες αποτελούν ένα πολύπλοκο μίγμα πολυπυρηνικών συμπλεγμάτων που δεν έχουν δεδομένο σημείο τήξης. Περιέχουν σημαντικό ποσοστό θείου, αζώτου και οξυγόνου, ενώ σε μικρότερα ποσοστά φέρουν βαριά μέταλλα, όπως σίδηρο, νικέλιο και βαννάδιο (Λόης, Ζαννίκος, & Καρώνης, 2014). Τα ασφατένια είναι ανεπιθύμητα καθώς τείνουν να διαχωρίζονται από το υπόλοιπο καύσιμο, σχηματίζοντας αδιάλυτα ιζήματα. Παράλληλα, τα μέταλλα που περιλαμβάνουν, μετατρέπονται κατά την καύση στα αντίστοιχα οξείδια, προκαλώντας φθορές στο σύστημα του κινητήρα. Εκτός των παραπάνω, τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, έχουν μειωμένη ικανότητα να παρέχουν κατάλληλη λίπανση και να μειώνουν τις τριβές των κινούμενων τμημάτων του κινητήρα, αυξάνοντας τον κίνδυνο φθορών (Hazrat, Rasul, & Khan, 2015). Τα εξαρτήματα που επηρεάζονται συνήθως είναι οι αντλίες καυσίμου και το σύστημα ψεκασμού. Τέλος, τα σύγχρονα καύσιμα που έχουν μειωμένη συγκέντρωση θείου είναι περισσότερο επιρρεπή στον σχηματισμό παραφινικών υπολειμμάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες, τα οποία συσσωρεύονται στα φίλτρα και επιφέρουν μειωμένη ροή του καυσίμου.

Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με την ανάπτυξη βελτιωμένων καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, καθώς και τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας τους με τακτική δειγματοληψία. Παράλληλα, η σύνθεση προσθέτων, τα οποία θα ενισχύουν την σταθερότητα των καυσίμων και τη λιπαντικότητα τους, θα συνέβαλλε σημαντικά στην πρόληψη της φθοράς του κινητήρα. Εκτός αυτών, οι κατασκευαστές των μηχανών πρόωσης οφείλουν να λάβουν υπόψη τους τις σύγχρονες τάσεις στα ναυτιλιακά καύσιμα και να προβούν στις κατάλληλες τροποποιήσεις.

1.2 Εναλλακτικοί τρόποι πρόωσης των πλοίων

Οι [περιορισμοί](#) που τέθηκαν πρόσφατα σε ισχύ στον τομέα της ναυτιλίας έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη καυσίμων φιλικότερων προς το περιβάλλον. Εκτός αυτού, έχουν ενισχύσει τις έρευνες που πραγματοποιούνται αναφορικά με τις εναλλακτικές επιλογές πρόωσης των πλοίων. Οι περισσότερες μελέτες περιστρέφονται γύρω από την χρήση χημικών ενώσεων που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια σε μηχανική, όπως αναφέρθηκε [παραπάνω](#). Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες μορφές ενέργειας, οι οποίες θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν προκειμένου να υποστηρίξουν τη ναυσιπλοΐα.

Ηλεκτρική πρόωση με μπαταρίες

Μία πρόταση είναι η χρήση μπαταριών ως μέσων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδότηση των ηλεκτροκινητήρων που κινούν την προπέλα (Jeong, et al., 2022). Πρόκειται για μία επιλογή με μηδενικές εκπομπές ρύπων, οικονομικότερη συγκριτικά με το κόστος των παραδοσιακών ναυτιλιακών καυσίμων, η οποία παρέχει ευελιξία στα πλοία. Ωστόσο, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις που χρειάζεται να συνυπολογιστούν προτού εφαρμοστούν εκτεταμένα στη ναυτιλία. Πρώτα απ' όλα, η περιορισμένη ενεργειακή χωρητικότητα της τρέχουσας τεχνολογίας μπαταριών καθιστά πολύ δύσκολη την χρήση τους, ειδικά για μεγάλες αποστάσεις. Παράλληλα, το μέγεθος και το βάρος των μπαταριών ενδέχεται να αποτελέσει έναν ανασταλτικό παράγοντα, καθώς επηρεάζει τον σχεδιασμό του σκάφους και την χρήση του χώρου (Batteries on board ocean-going vessels, 2019). Εκτός των παραπάνω, δεν υπάρχει προς το παρόν κατάλληλο δίκτυο τροφοδότησης των μπαταριών σε λιμάνια και τερματικούς σταθμούς. Επιπλέον, η διάρκεια φόρτισης μπορεί να αποτελεί μία σημαντική τροχοπέδη για τα πλοία, τα οποία οφείλουν να τηρούν συγκεκριμένους χρόνους αναχώρησης – άφιξης στα λιμάνια με βάση τα ναυλοσύμφωνα που έχουν συνάψει. Τέλος, η ασφάλεια των μπαταριών είναι ένα κρίσιμο ζήτημα, καθώς ενέχουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς σε περίπτωση ακατάλληλου χειρισμού (Kolodziejcki & Michalska - Pozoga, 2022).

Αιολική πρόωση

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί συστήματα πρόωσης πλοίων με τη βοήθεια του ανέμου προκειμένου να περιοριστεί η κατανάλωση καυσίμων και οι εκπομπές καυσαερίων. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν την αιολική ενέργεια ώστε να δώσουν επιπλέον ώθηση στα σκάφη. Η βοηθητική πρόωση αποδίδεται μέσω καινοτόμων μηχανικών ιστίων, τα οποία διαθέτουν μηχανισμούς μεγάλης αεροδυναμικής απόδοσης (Φακιολάς, 2021). Ως εκ τούτου, πολλαπλασιάζουν την αποδιδόμενη προωστική δύναμη κατά 2 έως 10 φορές, οδηγώντας σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των ρύπων κατά 10-30% (Ζήκου & Ζαφειριάδης, 2018). Στα μηχανικά ιστία συγκαταλέγονται συστήματα όπως περιστρεφόμενοι ρότορες (Flettner Rotors), πτερύγια (Wing

Sails) και ιπτάμενοι αετοί (Airborne Kites). Η κύρια πρόκληση που ανακύπτει είναι η εξάρτηση από τις συνθήκες του ανέμου, οι οποίες είναι απρόβλεπτες και ευμετάβλητες. Συνεπώς, τα πλοία εξακολουθούν να χρειάζονται συμβατικές μηχανές, όταν η αιολική ενέργεια δεν επαρκεί. Παράλληλα, η εγκατάσταση συστημάτων υποβοηθούμενων από τον άνεμο στο κατάστρωμα, μπορεί να επηρεάσει την κατανομή βάρους και τον χώρο που δεσμεύουν, απαιτώντας τροποποιήσεις στον σχεδιασμό των πλοίων. Τέλος, υπάρχουν αυξημένες ανάγκες συντήρησης για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία και η ασφάλεια τους.



Εικόνα 50: Εγκατάσταση αιολικών συστημάτων βοηθητικής πρόωσης στα πλοία

Ηλιακή πρόωση

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την πρόωση πλοίων με την χρήση κατάλληλων ηλιακών συλλεκτών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν στο κατάστρωμα ενός πλοίου προκειμένου να συλλέξουν την ηλιακή ακτινοβολία (Minak, 2023). Στην συνέχεια, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ώστε να τροφοδοτήσει ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, καθώς και να καλύψει άλλες ανάγκες φορτίων εν πλω. Μία ακόμα εφαρμογή είναι η φόρτιση μπαταριών που υποστηρίζουν τους ηλεκτροκινητήρες. Η χρήση των ηλιακών συλλεκτών θεωρείται ως μία περιβαλλοντικά φιλική επιλογή διότι μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και εκπομπής καυσαερίων. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν περιορισμένη ικανότητα παραγωγής ενέργειας και εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και το ποσοστό ηλιοφάνειας. Επιπλέον, ο διαθέσιμος χώρος στο κατάστρωμα μπορεί να είναι περιορισμένος και η εγκατάστασή τους να

επηρεάσει την κατανομή του βάρους. Για τους λόγους αυτούς, ο ρόλος της ηλιακής ενέργειας προς το παρόν είναι καθαρά βοηθητικός.



Εικόνα 51: Εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών στο κατάστρωμα ενός πλοίου

1.3 Χρησιμότητα περιοχών ECA

Οι περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών αερίων (ECA) έχουν οριοθετηθεί με σκοπό τη μείωση αερίων, επιβλαβών για το περιβάλλον και την υγεία, όπως έχει [αναφερθεί προηγουμένως](#). Θεωρείται ότι μπορούν να συμβάλλουν στον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ιδιαίτερα σε περιοχές αυξημένης διέλευσης πλοίων. Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων, υπάρχει προβληματισμός σχετικά με την πραγματική χρησιμότητα τους. Πρώτα απ' όλα, η επιβολή του κανονισμού [IMO 2020](#) στοχεύει στη μείωση κατά 77% των συνολικών εκπομπών οξειδίων του θείου από τον ναυτιλιακό κλάδο (Sun, Yang, & Zheng, 2020). Η επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου ενδέχεται να εγείρει αμφιβολίες για την ανάγκη ύπαρξης ξεχωριστών περιοχών ελέγχου των αερίων ρύπων. Παράλληλα, η αποτελεσματικότητα των περιοχών ECA έγκειται στην πρόθεση των πλοίων και των εταιρειών διαχείρισης να συμμορφωθούν με τους εκάστοτε περιορισμούς. Για το λόγο αυτό άλλωστε κρίνεται απαραίτητη η διενέργεια τακτικών ελέγχων στα σκάφη που εισέρχονται στις περιοχές ελέγχου, καθώς και η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Ωστόσο, αυτό απαιτεί αυξημένους πόρους, υποδομές και εργατικό δυναμικό ώστε να διασφαλιστεί η τήρηση των ορίων εκπομπής καυσαερίων. Οι ECA, λοιπόν, δύνανται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όμως για να

επιτευχθεί αυτό χρειάζεται αποτελεσματική επιβολή των περιορισμών, συνεχής παρακολούθηση και παγκόσμια συνεργασία.

1.4 Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Πλοίων (EEXI)

Ο δείκτης **Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI)** έχει δημιουργηθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (IMO) για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των υφιστάμενων πλοίων (EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system, 2023). Εντάσσεται στα μέτρα που λαμβάνει ο IMO για την επίτευξη της μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος της ναυτιλίας κατά 40% έως το 2030. Σκοπός είναι να εντοπίσει ευκαιρίες για βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης του υπάρχοντος στόλου και να μειώσει τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων που εντείνουν το **φαινόμενο του θερμοκηπίου**. Από την **1^η Ιανουαρίου 2023**, όλα τα πλοία οφείλουν να δηλώσουν τον συγκεκριμένο δείκτη. Ο EEXI υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές της κύριας και βοηθητικής μηχανής πρόωσης, τις τεχνολογίες ενεργειακής εξοικονόμησης, την ταχύτητα πλεύσης και διορθωτικούς συντελεστές ανάλογα τον τύπο του πλοίου. Το τελικό αποτέλεσμα εκφράζεται σε **gr CO₂ / ton – mile** και με βάση αυτό καθορίζεται αν τα πλοία χρειάζεται να προβούν σε περαιτέρω ενέργειες συμμόρφωσης. Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας έχει ορίσει προθεσμίες εντός των οποίων οφείλουν τα σκάφη να επιτύχουν τα απαιτούμενα επίπεδα EEXI, αλλιώς ενδέχεται να αντιμετωπίσουν οικονομικές κυρώσεις και γεωγραφικούς περιορισμούς.

1.5 Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII)

Ο δείκτης **Carbon Efficiency Indicator (CCI)** επικεντρώνεται στις εκπομπές οξειδίων του άνθρακα κατά τη λειτουργία ενός σκάφους (Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force, 2022). Υπολογίζεται σε **gr CO₂ / cargo carrying capacity – mile** και με βάση αυτό πραγματοποιείται η ταξινόμηση των πλοίων σε πέντε κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης A-E, όπου ως A ορίζεται η βέλτιστη απόδοση (Γραμμένος, 2023). Όπως και στην περίπτωση του δείκτη EEXI, όλα τα σκάφη οφείλουν να δηλώσουν την κατάταξη τους κατά **CII** από την **1^η Ιανουαρίου 2023**. Όσα έχουν βαθμολογηθεί χαμηλότερα από C, χρειάζεται να υποβάλουν ένα σχέδιο με τα διορθωτικά μέτρα που θα λάβουν ώστε να διορθώσουν τον δείκτη CII. Ορισμένες από τις ενέργειες στις οποίες μπορούν να προβούν ώστε να βελτιώσουν την κατάταξη τους είναι η χρήση καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα, ο καθαρισμός του κελύφους του πλοίου, η βελτιστοποίηση της ταχύτητας τους και η εγκατάσταση αιολικών – ηλιακών συστημάτων βοηθητικής πρόωσης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ajanovic, A., Sayer, M., & Haas, R. (2022, July). *The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen*. Ανάκτηση από Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007066>
- Alagumalai, A., Jodat, A., Mahian, O., & Ashok, B. (2022, January 14). *NOx formation chemical kinetics in IC engines*. Ανάκτηση από Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128239551000024>
- Allal, A., Mansouri, K., Youssfi, M., & Qbadou, M. (2019, May). *Toward an evaluation of marine fuels for a clean and efficient autonomous ship propulsion energy*. Ανάκτηση από Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319305978>
- Alturki, W. (2017). Four-stroke and two-stroke marine engines comparison and application. *Int. Journal of Engineering Research and Application*, 49-56.
- Alvarez, P. (2021, September). *From maritime salvage to IMO 2020 strategy: Two actions to protect the environment*. Ανάκτηση από Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X2100624X>
- Ammar, N. (2019, April). *An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship*. Ανάκτηση από Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920918310812>
- Ariemma, G., Sorrentino, G., Ragucci, R., Joannon, M., & Sabia, P. (2022, July). *Ammonia/Methane combustion: Stability and NOx emissions*. Ανάκτηση από Science Direct:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218022000906>
- Aronietis, R., Sys, C., van Hassel, E., & Vanelslander, T. (2017). *Investigating the bunkering choice determinants: the case of the port of Antwerp*. Ανάκτηση από Springer:
<http://link.springer.com/content/pdf/10.1186/s41072-017-0025-7.pdf>
- Ashok, B. (2021). *NOx Emission Control Technologies in Stationary and Automotive Internal Combustion Engines*. United States: Elsevier Science Publishing Co Inc.
- Bai, Y., & Jin, W.-L. (2016). *Marine Structural Design*. Butterworth-Heinemann.
- Batteries on board ocean-going vessels*. (2019). Ανάκτηση από MAN Energy Solutions:
https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=deaa76b8_14
- Bhatia, S. (2014). *Advanced Renewable Energy Systems*. Woodhead Publishing India.
- Bialystocki, N., & Konovessis, D. (2016). On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 157-166. Ανάκτηση από
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468013315300127>
- Bolla, M., Choudhury, H., & Moholkar, V. (2012, June). *Mechanistic features of ultrasound-assisted oxidative desulfurization of liquid fuels*. Ανάκτηση από ACS Publications:
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie300807a>

- Bumbiere, K., Gancone, A., Pubule, J., Kirsanovs, V., Vasarevicius, S., & Blumberga, D. (2020). *Ranking of boresources for biogas production*. Ανάκτηση από Sciendo: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/rtulect-2020-0021>
- Camoying, D. (2022, January). *Fuel change-over procedure*. Ανάκτηση από Skuld: <https://www.skuld.com/topics/ship/bunkers/fuel-change-over-procedure/>
- Campos-Martin, J., Capel-Sanchez, M., Perez-Presas, P., & Fierro, J. (2016). *Oxidative processes of desulfurization of liquid fuels*. Ανάκτηση από MDPI: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/21476/1/JCTB-09-0731-final.pdf>
- Cappannelli, M., McGlade, C., Zeniewski, P., & Le Feuvre, P. (2019, February). *Outlook for biogas and biomethane*. Ανάκτηση από IEA: https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bcec-de92e9ab815f/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf
- Carvalho, F., Lacava, P., Rufino, C., Travieso Pedroso, D., Blanco Machin, E., H. M. Araujo, F., . . . Carvahlo, J. (2023, February 1). *Mixtures of heavy fuel oil and green hydrogen in combustion equipment: Energy analysis, emission estimates and economic prospects*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422014078#e0010>
- Chafale, A., & Kapley, A. (2022, June). *Biosurfactants as microbial bioactive compounds in microbial enhanced oil recovery*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165622001055>
- Clevelant, C. (2004). *Encyclopedia of energy*. Elsevier.
- Comer, B. (2020, June). *Scrubbers on ships: Time to close the open loop (hole)*. Ανάκτηση από The International Council on Clean Transportation: <https://theicct.org/scrubbers-on-ships-time-to-close-the-open-loop-hole/>
- Demir, M., & Citakoglu, F. (2022, June). *Design and modeling of a multigeneration system driven by waste heat of a marine diesel engine*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922022819>
- EEXI and CII - ship carbon intensity and rating system*. (2023, September). Ανάκτηση από International Maritime Organization: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/EEXI-CII-FAQ.aspx>
- Elliott, L. (2022, April 26). *Ukraine war will mean high food and energy prices for three years*. Ανάκτηση από The guardian: <https://www.theguardian.com/business/2022/apr/26/ukraine-war-food-energy-prices-world-bank>
- Fahim, M., Alsahhaf, T., & Elkilani, A. (2010). *Fundamentals of petroleum refining*. Kuwait.
- Fan, L., Gu, B., & Luo, M. (2020, December). *A cost-benefit analysis of fuel switching vs hybrid scrubber installation: A container route through the Chinese SECA case*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X19308832>
- Fuel oil non-availability report (FONAR)*. (2019, October). Ανάκτηση από DNV: <https://www.dnv.com/news/fuel-oil-non-availability-report-fonar-what-you-need-to-know-->

- Hermesmann, M., & Muller, T. (2022). *Green, Turquoise, Blue or Grey ? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128522000053>
- Herson, M. (2023, February). *Ammonia takes centre stage as a clean marine fuel*. Ανάκτηση από Riviera: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/ammonia-takes-centre-stage-as-a-clean-marine-fuel-74978>
- Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S., & Lenaerts, S. (2021). *Challenges in the use of hydrogen for maritime applications*. Ανάκτηση από Royal society of chemistry: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ee/d0ee01545h>
- Huang, M., & Penning, T. (2014). *Processing Contaminants: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123786128002122>
- IMO 2020 - Cleaner shipping for cleaner air* . (2019, December 20). Ανάκτηση από IMO - International Maritime Organization: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>
- IMO 2020 - Cutting sulphur oxide emissions*. (χ.χ.). Ανάκτηση από International Maritime Organization: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- Inoue, T., & Yokoyama, T. (2018, April). *Marine SCR System for compliance with IMO NOx Tier 3 regulations*. Ανάκτηση από Yanmar: https://www.yanmar.com/global/about/technology/technical_review/2018/0413_2.html
- International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. (χ.χ.). Ανάκτηση από International Maritime Organization: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. (χ.χ.). Ανάκτηση από International Maritime Organization: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974*. (χ.χ.). Ανάκτηση από International Maritime Organization: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)
- Introduction to IMO*. (χ.χ.). Ανάκτηση από International Maritime Organization: <https://www.imo.org/en/about/pages/default.aspx#:~:text=IMO%20%E2%80%93%20the%20International%20Maritime%20Organization,supports%20the%20UN%20SDGs.%E2%80%8B>
- Isikli, E., Aydin, N., Bilgili, L., & Toprak, A. (2020, December). *Estimating fuel consumption in maritime transport*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620341871#bib25>

- ISO 8217: 2017 Petroleum products - Fuels (Class F) - Specifications of marine fuels. (2017). Ανάκτηση από ISO.org: <https://www.iso.org/standard/64247.html>
- Jansohn, P. (2013). *Modern gas turbine systems*. Woddhead Publishing.
- Javadli, R., & Klerk, A. (2012, March). *Desulfurization of heavy oil*. Ανάκτηση από Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13203-012-0006-6#citeas>
- Jawaid, M., Ahmad, A., & Bhaskar Reddy, V. (2022). *Ionic liquid - Based technologies for environmental sustainability*. Elsevier.
- Jeong, B., Jang, H., Lee, W., Park, C., Ha, S., Kim, D., & Cho, N.-K. (2022, June). *Is electric battery propulsions for ships truly the lifecycle energy solution for marine environmental protection as a whole ?* Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622013695>
- Ji, J. (2020, February). *The IMO 2020 sulphur cap: a step forward for planetary health ?* Ανάκτηση από Science Direct: <https://protect-eu.mimecast.com/s/F8nfCVOW6F0qvyLtGjEyj?domain=sciencedirect.com>
- Jin, P., Zhang, J., Wan, J., Overmans, S., Gao, G., Ye, M., . . . Xia, J. (2021, December 23). *The combined effects of ocean acidification and heavy metals on marine organisms: A meta-analysis*. Ανάκτηση από Frontiers: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.801889/full>
- Karatug, C., Arslanoglu, Y., & Soares, G. (2022, October). *Feasibility analysis of the effects of scrubber installation on ships*. Ανάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/12/1838>
- Khan, K., Su, C.-W., & Zhu, M. (2022, January 15). *Examining the behaviour of energy prices to COVID-19 uncertainty: A quantile on quantile approach*. Ανάκτηση από National Library of Medicine: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8554693/>
- Khan, R. (2011). *Advances in clean hydrocarbon fuel processing*. Woodhead Publishing.
- Kianh, Y.-H. (2018). *Fuel property estimation and combustion process characterization*. Xiamen.
- Kolodziejski, M., & Michalska - Pozoga, I. (2022, December). *Battery energy storage systems in ships' hybrid/electric propulsion systems*. Ανάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1122>
- Kotowicz, J., Brzeczek, M., Walewska, A., & Szykowska, K. (2022, January). *Methanol production in the Brayton cycle*. Ανάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/4/1480>
- Ladwig, K., & Blythe, G. (2017). *Coal combustion products (CCP's)*. United States.
- Latarche, M. (2021). *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. Elsevier.
- Lee, Y. A., Park, Y. C., Kwon, O., Kim, S. J., Chung, S., & Moon, M.-W. (2022, September 1). *Hygroscopic ramie fabrics for recovering highly viscous low sulfur fuel oil*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974912200882X>

- Li, K., Wu, M., Gu, X., Yuen, K., & Xiao, Y. (2020, September). *Determinants of ship operators' options for compliance with IMO 2020*. Avάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920920306465>
- Lin, Y., Feng, L., Li, X., Chen, Y., Yin, G., & Zhou, W. (2020). *Ultrasonics Sonochemistry*. Guangzhou.
- Lindstad, H., Asbjornslett, B., & Stromman, A. (2011, June). *Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds*. Retrieved from Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511002242?via%3Dihub>
- Lindstad, H., Eskeland, G., Psaraftis, H., Sandaas, I., & Stromman, A. (2015, October). *Maritime shipping and emissions: A three-layered damage-based approach*. Avάκτηση από Science Direct: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0029801815005016?token=0D056C628E1D3986C1DD2776BDE65B4AC70427297A8CCDCFADAA12551B4E51B388DACD09689414C863CEE6AB22155A64&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221113070330>
- Machaj, K., Kupecki, J., Malecha, Z., Morawski, A., Skrzypkiewicz, M., Stanlik, M., & Chorowski, M. (2022). *Energy Strategy*. Warsaw: Elsevier.
- Mallouppas, G., Yfantis, E., Ioannou, C., Paradeisiotis, A., & Ktoris, A. (2023, January). *Application of biogas and biomethane as maritime fuels: A review of research, technology development, innovation proposals and market potentials*. Avάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/4/2066>
- Mamuad, R., & Earvin Sy Choi, A. (2023, March). *Biodesulfurization processes for the removal of sulfur from diesel oil: A perspective report*. Avάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2738>
- Mandra, J. O. (2023, January 19). *185 global ports can bunker LNG*. Avάκτηση από Offshore Energy: <https://www.offshore-energy.biz/185-global-ports-can-bunker-lng/>
- Marine distillate fuels ISO 8217:2017*. (2017). Avάκτηση από Exxon Mobil: <https://www.exxonmobil.com/marine/-/media/project/wep/exxonmobil/exxonmobil-marine/exxonmobil-marine-distillate-fuels.pdf>
- Martinez-Lopez, A., Marrero, A., Martin-Cruz, Y., & Miguez Gonzalez, M. (2022, November). *Environmental assessment model for scrubbers versus alternative mitigation systems for feeder vessels in liner shipping*. Avάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722015274>
- Merien-Paul, R., Enshaei, H., & Jayasinghe, S. (2019, April). *Effects of fuel-specific energy and operational demands on cost/emission estimates: A case study on heavy fuel-oil vs liquefied natural gas*. Avάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920918305431>
- Miller, R., & Bjornstad, E. (2013). *Biodiesel: Advantages and potential problems*. Avάκτηση από Bell Performance: https://cdn2.hubspot.net/hub/68152/file-458350385-pdf/Bell_Performs/Biofuels_-_Advantages_and_Potential_Problems.pdf?t=1423850615361

- Minak, G. (2023, June). *Solar energy-powered boats: State of the art and perspectives*. Ανάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/8/1519>
- Mirshafiee, F., Movahedirad, S., Sobati, M., Alaei, R., Zarei, S., & Sargazi, H. (2023, February). *Current status and future prospects of oxidative desulfurization of naphtha: a review*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582022010540>
- Mohammadi, M., Khanmohammadi Khorrami, M., Vatanparast, H., Karimi, A., & Sadrara, M. (2022). *Infrared physics and technology*. Tehran. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449522003632>
- Mokhatab, S., Mak, J., Valappil, J., & Wood, D. (2013). *Handbook of liquefied natural gas*. Gulf Professional Publishing.
- Mueller, N., Westerby, M., & Nieuwenhuijsen, M. (2023, January 1). *Health impact assessments of shipping and port-sourced air pollution on a global scale: A scoping literature review*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393512201787X>
- Nriagu, J. (2019). *Encyclopedia of environmental health*. Elsevier.
- Omar, R., & Verma, N. (2022, June). *Review of adsorptive desulfurization of liquid fuels and regeneration attempts*. Ανάκτηση από ACS Publications: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.2c01426>
- Omatick, T., Zhang, D., Blais, M., Mossoly, M., Renzi, P., Kurz, R., . . . Harvey, S. (2022). *Machinery and energy systems for the hydrogen economy*. Elsevier.
- Papadopoulos, C., Kourtelesis, M., Moschovi, A., Sakkas, K., & Yakoumis, I. (2022, August 30). *Selected techniques for cutting SOx emissions in maritime industry*. Ανάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/2227-7080/10/5/99>
- Pattabathula, V., & Richardson, J. (2016, September). *Introduction to ammonia production*. Ανάκτηση από AiChE: <https://www.aidche.org/resources/publications/cep/2016/september/introduction-ammonia-production>
- Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., & Rutherford, D. (2020, January). *The climate implications of using LNG as a marine fuel*. Ανάκτηση από Science Direct: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/LNG-as-marine-fuel-working-paper-02_FINAL_20200416.pdf
- Poulsen, M., Strom, H., Sasic, S., Sorensen, K., & Condra, T. (2023, March). *Development and calibration of a model for packed bed marine scrubbers aboard ocean-going vessels*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876222007225>
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The geography of transport systems*. London: Routledge.
- Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force*. (2022, November). Ανάκτηση από International Maritime Organization: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/CII-and-EEXI-entry-into-force.aspx>
- Saha, B., Vedachalam, S., & Dalai, A. (2021). *Fuel Processing Technology*. Perth.

- Schinas, O., & Oroulidis, G. (2022, March). *Assessing the impact of sulphur cap on bunkering spot selection in the ARA region*. Ανάκτηση από Springer Link: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13437-021-00257-9#Sec2>
- Serra, P., & Fancello, G. (2020, February 20). *Towards the IMO's GHG Goals: A critical overview of the perspectives and challenges of the main options for decarbonizing international shipping*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://com-mendeley-prod-publicsharing-pdfstore.s3.eu-west-1.amazonaws.com/2c5b-CC-BY-2/10.3390/su12083220.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjECwaCWV1LXdlc3QtMSJHMEUCIQCl0zKABztXj6MVhRUD%2Fk8NCJsw8kx5jXKXKNAYiSbf%2FglL76b5A8kvh2EB%2B%2BrvfuoH0ETX72>
- Smyshlyaeva, K., Rudko, V., Kuzmin, K., & Povarov, V. (2022, November). *Asphaltene genesis influence on the low-sulfur residual marine fuel sedimentation stability*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122021263>
- Stout, S. A., & Wang, Z. (2016). *Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics*. Academic Press.
- Sulfur Dioxide Basics*. (2023, February 16). Ανάκτηση από EPA - United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
- Sultanbekov, R., Denisov, K., Zhurkevich, A., & Islamov, S. (2022, November 16). *Reduction of Sulphur in Marine Residual Fuels by Deasphalting to Produce VLSFO*. Ανάκτηση από Journal of Marine Science and Engineering: <file:///t-vsrv-fs/Redirected%20Folders/k.baritaki/Desktop/jmse-10-01765-v2.pdf>
- Sun, X., Liu, C., Wang, J., & Li, J. (2020, March). *Assessing the extreme risk spillovers of international commodities on maritime markets: A GARCH-Copula-CoVaR approach*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1057521919303904>
- Sun, Y., Yang, L., & Zheng, J. (2020, July). *Emission control areas: More or fewer ?* Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920920305368>
- Suppes, G., & Storvick, T. (2016). *Sustainable power technologies and infrastructure*. Academic Press.
- Sveistrup Jacobsen, D., Krantz, R., Mouftier, L., & Skov Christiansen, E. (2022, March). *Ammonia as a shipping fuel*. Ανάκτηση από Global Maritime Forum: <https://www.globalmaritimeforum.org/news/ammonia-as-a-shipping-fuel>
- Teuchies, J., Cox, T., Itterbeeck, K., Meysman, F., & Blust, R. (2020, July 23). *The impact of scrubber discharge on the water quality in estuaries and ports*. Ανάκτηση από Springer Open: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-00380-z>
- Thomson, H., Corbett, J., & Winebrake, J. (2015, December). *Natural gas as a marine fuel*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515300665>
- UNCTAD. (2021, November 18). Ανάκτηση από <https://unctad.org/meeting/launch-review-maritime-transport-2021>
- UNCTAD. (2021). *Review of maritime transport 2021*. Ανάκτηση από UNCTAD: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf

- Vedachalam, S., Baquerizo, N., & Dalai, A. (2022, February). *Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121021189>
- Venselaar, J. (1992). *Evolution of flue gas desulphurisation processes*. Ανάκτηση από Academia: https://www.academia.edu/7979604/Evolution_of_Flue_Gas_Desulphurisation_Processes
- Verhelst, S., Turner, J., Sileghem, L., & Vancoillie, J. (2019, January). *Methanol as a fuel for internal combustion engines*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036012851830042X#sec0010>
- Vetter, S., Kuhnert, M., & Smith, P. (2022). *Biological carbon sequestration technologies*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323903868000413>
- Wang, X., & Schrader, W. (2015, December). *Selective analysis of sulfur-containing species in a heavy crude oil by deuterium labeling reactions and ultrahigh resolution mass spectrometry*. Ανάκτηση από MDPI: <https://www.mdpi.com/1422-0067/16/12/26205>
- Zhao, L., & Liu, J. (2022, June). *Fast real-time measurement method of a wet scrubber on particle purification efficiency with image information entropy analysis*. Ανάκτηση από Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322003705>
- Βαλαβανίδης, Θ., & Ευσταθίου, Κ. (2011, Νοέμβριος). *Αμμωνία*. Ανάκτηση από Η χημική ένωση του μήνα: http://195.134.76.37/chemicals/chem_ammonia.htm
- Γιακουμής, Ε. (2021). *Αρχές Μηχανών Εσωτερικής Καύσης*. Αθήνα.
- Γραμμένος, Π. (2023, January). *Ο δείκτης αποτυπώματος άνθρακα CII και οι επιπλοκές στη διεθνή ναυτιλία*. Ανάκτηση από The power game: <https://www.powergame.gr/navtilia/382115/o-deiktis-apotyptomatos-anthraka-cii-kai-oi-epiplotkes-sti-diethni-naftilia/>
- Ζήκου, Α., & Ζαφειριάδης, Ι. (2018, November). *Η αιολική ενέργεια στη ναυτιλία*. Ανάκτηση από Energy matters to climate change: <https://www.e-mc2.gr/el/node/1621>
- Ζιώμας, Γ. (2007). *Ατμόσφαιρα - Ατμοσφαιρική Ρύπανση*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ζυγομάλας, Ν. (2021). *Μεταφορά Φορτίων*. Αθήνα: Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού.
- Λόης, Ε., Ζαννίκος, Φ., & Καρώνης, Δ. (2014). *Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών*. Αθήνα.
- Ρακόπουλος, Κ. Δ. (2013). *Μηχανές εσωτερικής καύσης Ι, εμβολοφόρες και αεριοστρόβιλοι*. Αθήνα: Foundas.
- Τριπολίτης, Κ., & Τριάντης, Γ. (χ.χ.). *Ναυτική τέχνη - Έκτακτες ανάγκες*. Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων - Αθηνά.
- Φακιολάς, Κ. (2021, May). *Αιολική ενέργεια: Το επόμενο βήμα για πλοία μηδενικών εκπομπών*. Ανάκτηση από Isalos.net: <https://www.isalos.net/2021/05/aioliki-energeia-epomeno-vima-gia-ploia-midenikon-ekprompon/>

Φωκιανού, Τ. (2020, Νοέμβριος). *Το μπλε υδρογόνο κλειδί για την μετάβαση στην πράσινη ενέργεια*.
Ανάκτηση από Energia: <https://www.energia.gr/article/172387/to-mple-ydrogono-kleidi-gia-tin-metavash-sthn-prasinh-energeia>

Χαραλάμπους, Α. (2007). *Υδατικό Περιβάλλον*. ΑΘΗΝΑ: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.

Χριστακόπουλος, Π., & Τόπακας, Ε. (2016). *Βιοτεχνολογία παραγωγής βιοκαυσίμων*. Αθήνα:
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.