



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ

«Ο αντίκτυπος των νέων κανονισμών του IMO στο LNG: Εναλλακτικά σενάρια και η περίπτωση της διεθνούς ναυτιλίας»

Πτυχιακή Εργασία για το Προπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

ΠΑΓΚΡΑΤΗ ΕΛΕΝΗ

Ημερομηνία 24/06/2022

ΧΙΟΣ

ΠΑΓΚΡΑΤΗ ΕΛΕΝΗ

«Ο αντίκτυπος των νέων κανονισμών του IMO στο LNG: Εναλλακτικά σενάρια και η περίπτωση της διεθνούς ναυτιλίας»

Ημερομηνία 24/06/2022

Πτυχιακή Εργασία για το Προπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

Συγγραφέας: ΠΑΓΚΡΑΤΗ ΕΛΕΝΗ

Επιβλέπων/-ουσα: Κα. ΘΑΝΟΠΟΥΛΟΥ ΕΛΕΝΗ

ΧΙΟΣ

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων από την εφαρμογή των νέων κανονισμών του IMO, όπως αυτοί εισήχθησαν το 2020 σχετικά με τις εκπομπές διοξειδίων του θείου, στη χρήση του υγροποιημένου φυσικού αερίου (Liquefied Natural Gas – LNG) για την πρόωση των πλοίων. Ο περιορισμός του εκπεμπόμενου θείου από 3,5 σε 0,5% σημαίνει ότι οι πλοιοκτήτες δεν μπορούν πλέον να χρησιμοποιούν καύσιμο με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο δίχως να έχουν κάνει κατάλληλες τροποποιήσεις στα πλοία τους. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται, μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, οι διάφορες επιλογές των πλοιοκτητών προκειμένου να επιτύχουν τη συμμόρφωση με τα νέα πρότυπα του IMO. Τέτοιες επιλογές περιλαμβάνουν τη χρησιμοποίηση καυσίμου με χαμηλή περιεκτικότητα σε καύσιμο, την εγκατάσταση πλυντρίδων για τη συνέχιση χρησιμοποίησης καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, ή τη στροφή στη χρησιμοποίηση του υγροποιημένου φυσικού αερίου. Πραγματοποιείται μία ανάλυση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από τη χρήση του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως καυσίμου στη ναυτιλία σε σχέση με τα υπόλοιπα καύσιμα, ενώ επιπλέον παρουσιάζονται και οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν για τη μετασκευή ενός πλοίου για πρόωση με υγροποιημένο φυσικό αέριο. Επιπλέον, καταγράφονται οι υποδομές που απαιτούνται για την ευρεία χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου καυσίμου. Τέλος, παρουσιάζεται η κατάσταση της υιοθέτησης του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως καυσίμου στη διεθνή ναυτιλία σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία, καθώς και η ανάπτυξη των σχετικών υποδομών αποθήκευσης και ανεφοδιασμού. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο αποτελεί ένα καύσιμο με πολλές προοπτικές, το οποίο εγγυάται τη συμμόρφωση με τα πρότυπα του IMO και τη μετάβαση σε πιο «πράσινα» καύσιμα, όπως το bio-LNG και το συνθετικό υγροποιημένο φυσικό αέριο. Κατά πόσο η επένδυση στη χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι αποδοτική, πάντως, καθορίζεται πάντα από τη συσχέτιση των τιμών με το πετρέλαιο την εκάστοτε χρονική στιγμή.

Λέξεις-κλειδιά: φυσικό αέριο, υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), International Maritime Organization (IMO), ναυτιλιακό καύσιμο, εκπομπές οξειδίων του θείου και του αζώτου, διοξείδιο του άνθρακα

Abstract

The purpose of this paper is to study the effects of the application of the new IMO regulations, as introduced in 2020 regarding sulfur dioxide emissions, on the use of liquefied natural gas (LNG) for the purposes of ship propulsion. The reduction of emitted sulfur from 3.5 to 0.5% means that shipowners can no longer use high-sulphur fuel without making appropriate modifications to their ships. In this paper, through a literature review, the various options for shipowners to achieve compliance with the new IMO standards are presented. Such options include using low-sulfur fuel, installing scrubbers to continue using high-sulfur fuel, or switching to using liquefied natural gas. An analysis is made of the advantages and disadvantages of the use of liquefied natural gas in shipping in relation to other fuels, and the modifications that must be made to retrofit a ship for propulsion with liquefied natural gas are presented. Additionally, the infrastructure required for the widespread use of this fuel is presented. Finally, the status of LNG adoption as a fuel in international shipping is presented according to the most recent data, as well as the development of the related storage and supply infrastructure. LNG is a fuel with many prospects, guaranteeing compliance with IMO standards and the transition to greener fuels such as bio-LNG and synthetic liquefied natural gas. To what extent the investment in the use of liquefied natural gas is efficient, however, is always determined by the correlation of prices with oil at any given time.

Key-words: natural gas, liquefied natural gas (LNG), International Maritime Organization (IMO), marine fuel, emissions of sulfur and nitrogen oxides, carbon dioxide

Κατάλογος περιεχομένων

Περίληψη	2
Λέξεις-κλειδιά.....	2
Abstract.....	3
Key-words.....	3
Κατάλογος εικόνων.....	6
Κατάλογος πινάκων	6
Κατάλογος διαγραμμάτων	6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	8
1.2 Δομή και μεθοδολογία	11
Κεφάλαιο 2: Το LNG ως καύσιμο και θεσμικό πλαίσιο	13
2.1 International Maritime Organization και θεσμικό πλαίσιο για εκπομπές αερίων	13
2.2 Η ευκαιρία για το LNG: Σύμβαση MARPOL και καύσιμα	16
2.3 Σχεδιασμός, ασφάλεια και καταλληλότητα του LNG	19
Κεφάλαιο 3: Το LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο και άλλες επιλογές για τους πλοιοκτήτες	23
3.1 Καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.....	23
3.2 Βιοκαύσιμα	24
3.3 Πλυντρίδες (scrubbers).....	25
3.4 Κινητήρες με καύσιμο LNG	28
3.5 Σύγκριση κόστους LNG και βασισμένων στο πετρέλαιο καυσίμων.....	29
Κεφάλαιο 4: Υποδομές για τη χρήση του LNG ως καυσίμου στη ναυτιλία	36
4.1 Διαδικασίες ανεφοδιασμού.....	36
4.2 Λιμενικές υποδομές	38
4.3 Διαμόρφωση πλοίων για αξιοποίηση LNG	40

4.3.1 Δεξαμενές αποθήκευσης LNG.....	41
4.3.2 Επιλογή κινητήρων για καύση LNG.....	43
4.4 Οικονομικές απαιτήσεις.....	45
4.5 Πρόσφατες εξελίξεις στη χρήση του LNG στη διεθνή ναυτιλία	46
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	54
Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία	57
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	58
Διαδικτυακές πηγές.....	61

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Συστήματα πλυντρίδων κλειστού (αριστερά) και ανοιχτού βρόχου (δεξιά).....	26
Εικόνα 2. LNG bunkering: ανεφοδιασμός από πλοίο (αριστερά), ανεφοδιασμός σε λιμάνι (δεξιά)	37
Εικόνα 3. LNG bunkering: ανεφοδιασμός από βυτιοφόρο όχημα	38
Εικόνα 4. Η χρήση του LNG ως καυσίμου στη διεθνή ναυτιλία και τοποθεσίες κύριων ανεφοδιαστικών λιμένων, Ιανουάριος 2022	51
Εικόνα 5. LNG bunkers εν λειτουργία και υπό κατασκευή, 2022.....	53

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Όρια εκπομπών SO _x	8
Πίνακας 2. Όρια εκπομπών NO _x	8
Πίνακας 3. Σύσταση του υγροποιημένου φυσικού αερίου	10
Πίνακας 4. Κατηγοριοποίηση εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων	13
Πίνακας 5. Όρια θείου στις εκπομπές των κινητήρων των πλοίων σε περιοχές εντός και εκτός SECAs.....	17
Πίνακας 6. Επίπτωση στα επίπεδα εκπομπών από τη χρήση διαφόρων καυσίμων.....	21
Πίνακας 8. Ενδεικτική κατανάλωση LNG για επιλεγμένους τύπους πλοίων.....	36

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Μέση μηνιαία τιμή spot του φυσικού αερίου στο Henry hub των ΗΠΑ, σε δολάρια ανά MMBtu	30
Διάγραμμα 2. Σύγκριση των ναυτιλιακών καυσίμων σε λιμάνια της Ιαπωνίας, σε δολάρια ανά MMBtu (Πηγή: Global LNG Hub. (2019). LNG as a Maritime Fuel: Prospects and Policy.	

Διαθέσιμο εδώ: https://globalnghub.com/report-presentation/lng-as-a-maritime-fuel-prospects-and-policy)	31
Διάγραμμα 3. Μέση μηνιαία τιμή του LNG στο λιμάνι της Σιγκαπούρης, σε δολάρια ανά MMBtu	32
Διάγραμμα 4. Μέση μηνιαία τιμή του LNG στο λιμάνι του Ρότερνταμ, σε ευρώ ανά MW	33
Διάγραμμα 5. Μέση μηνιαία τιμή διάφορων τύπων καυσίμων στο λιμάνι του Ρότερνταμ, σε ευρώ ανά mt	34
Διάγραμμα 6. Μέση μηνιαία τιμή διάφορων τύπων καυσίμων στο λιμάνι της Σιγκαπούρης, σε δολάρια ανά mt	35
Διάγραμμα 8. Μεγαλύτεροι σε χωρητικότητα τερματικοί σταθμοί LNG παγκοσμίως, Σεπτέμβριος 2021 (σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους / έτος)	39
Διάγραμμα 9. Μεγαλύτεροι σε χωρητικότητα υπό κατασκευή ή συζήτηση τερματικοί σταθμοί LNG παγκοσμίως, Σεπτέμβριος 2021 (σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους / έτος)	40
Διάγραμμα 10. Πλήθος πλοίων σε λειτουργία και υπό παραγγελία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG, καθώς και πλοίων που δύνανται να τροποποιηθούν για χρήση καυσίμου LNG, 2000-2024	48
Διάγραμμα 11. Πλήθος κινούμενων με LNG πλοίων παγκοσμίως ανά τύπο, Μάιος 2020	50

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Ένας από τους κινητήριους παράγοντες πίσω από την ώθηση προς εναλλακτικά καύσιμα όπως το LNG οφείλεται σε αποφασιστικούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς που ορίζονται από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO). Από τον Ιανουάριο του 2020, έχει επιβληθεί παγκόσμιο ανώτατο όριο θείου 0,5% στα εμπορικά πλοία εκτός των περιοχών ελέγχου εκπομπών, ενώ το προηγούμενο όριο ανερχόταν στο 3,5%. Εντός περιοχών ελέγχου των εκπομπών, το όριο ανερχόταν ήδη από το 2015 στο 0,1%. Οι σύγχρονες τεχνολογίες βελτίωσης της απόδοσης μπορούν να βοηθήσουν τους πλοιοκτήτες να μειώσουν τα επίπεδα εκπομπών των πλοίων τους, αλλά η επίτευξη των δύσκολων στόχων που έχει θέσει IMO για το 2030 και το 2050 απαιτεί προσπάθεια σε πολλαπλά μέτωπα. Η μετάβαση σε ένα εναλλακτικό, καθιερωμένο καύσιμο όπως το LNG προσφέρει άμεσα οφέλη όσον αφορά τις μειώσεις άνθρακα, SO_x και NO_x.

Πίνακας 1. Όρια εκπομπών SO_x

Ημερομηνία εφαρμογής	Όριο εκπομπών SO _x εκτός SECA (%)	Ημερομηνία εφαρμογής	Όριο εκπομπών SO _x εντός SECA (%)
Πριν την 1.1.2012	4,5	Πριν την 1.7.2010	1,5
Μετά την 1.1.2012	3,5	Μετά την 1.7.2010	1,0
Μετά την 1.1.2020	0,5	Μετά την 1.1.2015	0,1

Επεξεργασία δεδομένων από: Κοϊμτζής, Ε. (2019). Εξελίξεις και προοπτικές για τη χρήση του φυσικού αερίου ως καυσίμου στην ακτοπλοΐα. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο εδώ: <https://hellenicus.lib.aegean.gr/handle/11610/20270>

Πίνακας 2. Όρια εκπομπών NO_x

Tier	Έτος εφαρμογής	Όριο εκπομπών NO _x (gr/kWh)		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
I	2000	17,0	45 · n ^{-0,2}	9,8
II	2011	14,4	44 · n ^{-0,23}	7,7
III	2016 (εντός SECA)	3,4	9 · n ^{-0,2}	1,96

Επεξεργασία δεδομένων από: Κοϊμτζής, Ε. (2019). Εξελίξεις και προοπτικές για τη χρήση του φυσικού αερίου ως καυσίμου στην ακτοπλοΐα. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο εδώ: <https://hellenicus.lib.aegean.gr/handle/11610/20270>

Μέχρι το 2030, η ναυτιλιακή βιομηχανία καλείται να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα κατά 40%. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα πρωτοβουλιών που μπορούν να υιοθετηθούν, οι οποίες δύνανται να βελτιώσουν την απόδοση και να μειώσουν τις εκπομπές σε όλους τους τύπους των πλοίων. Η χρησιμοποίηση εναλλακτικών καυσίμων, όπως το LNG, αποτελεί μία εξ αυτών, αν και συχνά παραβλέπεται.

Η στροφή στη χρήση του LNG ως καυσίμου στη ναυτιλία προτείνει μία βιώσιμη λύση για τη βιομηχανία και διαδραματίζει ζωτικής σημασίας ρόλο όχι μόνο στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των πλοίων αλλά και στην εξάλειψη άλλων ρύπων. Η κατάλληλη μετατροπή των κινητήρων ούτως ώστε να λειτουργούν με καύσιμο LNG αποτελεί ένα πρώτο βήμα στην υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων. Η μετατροπή των κινητήρων και η μετασκευή εν γένει των πλοίων ούτως ώστε να χρησιμοποιούν ως καύσιμο, από το LNG, άλλους τύπους εναλλακτικών καυσίμων, όπως το bioLNG ή το συνθετικό μεθάνιο είναι δυνατή χωρίς την ανάγκη σημαντικών αλλαγών. Με άλλα λόγια, το LNG μπορεί να λειτουργήσει ως μεταβατικό στάδιο στη χρήση «πιο πράσινων» καυσίμων. Αμεσότερα, ωστόσο, η αξιοποίηση του LNG ως καυσίμου δύναται να μειώνει την εκπομπή αερίων, όπως CO₂, SO_x και NO_x, με τη διαφορά στο επίπεδο των εκπεμπόμενων αερίων σε σχέση με το βαρύ μαζούτ να είναι σημαντική. Κατά την αλλαγή χρήσης από HFO σε LNG, τα εκπεμπόμενα οξείδια του θείου εξαλείφονται πλήρως, τα εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου μειώνονται σημαντικά και τα λεγόμενα σωματίδια τοπικών εκπομπών ουσιαστικά εξαλείφονται. Αυτό είναι ξεκάθαρα ένα από τα σημαντικότερα οφέλη από τη στροφή στη χρήση του LNG ως καυσίμου που επιτρέπει στη ναυτιλία να γίνει πιο πράσινη. Επιπροσθέτως, το LNG είναι άμεσα διαθέσιμο, προσιτό και είναι προς το παρόν το μόνο εναλλακτικό καύσιμο που μπορεί να αξιοποιήσει την υπάρχουσα υποδομή και μια καλά εδραιωμένη τεχνολογία.

Με τους αυστηρότερους κανονισμούς του IMO για τους εκπεμπόμενους ρύπους που εισήχθησαν τον Ιανουάριο του 2020, τα περισσότερα πλοία χρησιμοποιούν πλέον βαρύ πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Ωστόσο, η χρήση μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο δε μειώνει τις εκπομπές CO₂. Καθίσταται σαφές πως δεν αρκεί απλώς ένα καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι που έχει θέσει ο IMO για μείωση των εκπομπών CO₂ κατά ποσοστό μεγαλύτερο από 40% μέχρι το 2030 σε σχέση με το 2008.

Η αξιοποίηση του LNG ως καυσίμου στη ναυτιλία μπορεί να επιτρέψει την άμεση μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 20%, αν και αυτό εξαρτάται φυσικά σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο

της εφαρμογής. Αν και το ζήτημα που φαίνεται να απασχολεί περισσότερο την παγκόσμια κοινότητα είναι η μείωση των εκπομπών του CO₂, δε θα πρέπει να αμελείται, κατά την αναφορά στα πλεονεκτήματα από τη χρήση του LNG και η σημαντικότερη μείωση που μπορεί να επιφέρει στις εκπομπές άλλων αερίων, η οποία μπορεί να αγγίξει μέχρι και μια μείωση της τάξης του 90% για το NO_x ενώ είναι εφικτό να υπάρξει και πλήρης εξάλειψη των εκπομπών SO_x. Επιπλέον, σύμφωνα με τον DNV ο ενεργειακός δείκτης αποδοτικότητας του σκάφους (EEXI - Energy Efficiency Existing Ship Index) αναμένεται να βελτιωθεί κατά περίπου 25% με τη μετατροπή σε χρήση LNG με βάση τις εκτιμήσεις ενώ το κόστος των καυσίμων, σε σύγκριση με το αργό μαζούτ, μπορεί να μειωθεί έως και 50%.

Το LNG έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο επειδή το θείο αφαιρείται κατά τη διαδικασία πριν από την υγροποίηση, επομένως κατά την καύση δεν εκπέμπονται σχεδόν καθόλου οξείδια του θείου (SO_x) ή σωματίδια άλλων ρύπων, ενώ εκπέμπονται σαφώς λιγότερα οξείδια του αζώτου (NO_x) και φυσικά CO₂ σε σχέση με άλλα ορυκτά καύσιμα. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο είναι επίσης σχετικά ασφαλές γιατί το ειδικό του βάρος είναι ελαφρύτερο από αυτό του αέρα και διαχέεται εύκολα, επομένως υπάρχει μικρότερος κίνδυνος έκρηξης. Επιπλέον, τα αποδεδειγμένα αποθέματά του ξεπερνούν αυτά του πετρελαίου και η ικανότητά του να παρέχει σταθερό μακροπρόθεσμο εφοδιασμό για περισσότερα από 50 χρόνια αποτελεί βασικό πλεονέκτημα.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο αριθμός των πλοίων με καύσιμα LNG έχει αυξηθεί από 18 ολοκληρωμένα πλοία το 2010 σε 195 σε λειτουργία, με περισσότερα από 200 σε παραγγελία το 2020 σύμφωνα με τον DNV GL. Τα περισσότερα από τα εν ενεργεία πλοία λειτουργούν στην Ευρώπη. Η ένταση του εμπορίου LNG αναμένεται να αυξηθεί κατά 21% το 2025 σε σύγκριση με το 2019.

Η παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου αυξάνεται κατά μέσο όρο 2,1% ετησίως, ενώ η παγκόσμια κατανάλωση κατά 1,7% ετησίως. Αυτή η αύξηση δείχνει ότι το φυσικό αέριο θα μπορούσε να είναι μια εναλλακτική λύση πιο βιώσιμη από άλλα παραδοσιακά υγρά καύσιμα όπως το βαρύ μαζούτ (HFO).

Πίνακας 3. Σύσταση του υγροποιημένου φυσικού αερίου

% mol

Οξυγόνο	O ₂	0-0,2
Άζωτο	N ₂	0-5,0
Διοξείδιο του άνθρακα	CO ₂	0-8,0
Υδρόθειο	H ₂ S	0-5,0
Μεθάνιο	CH ₄	70,0-90,0
Βουτάνιο	C ₄ H ₁₀	0-20,0
Προπάνιο	C ₃ H ₈	0-20,0
Αιθάνιο	C ₃ H ₆	0,-20,0

Επεξεργασία δεδομένων από: Mokhatab, S., Mak, J., Valappil, J., & Wood, D. A. (2014). Handbook of Liquefied Natural Gas. Elsevier. United States.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων των νέων κανονισμών του IMO στη χρήση του LNG ως καυσίμου στον ναυτιλιακό κλάδο. Ως εκ τούτου, θα μελετηθούν τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το LNG σε σχέση με άλλες εναλλακτικές επιλογές καυσίμων και θα παρουσιαστεί η πορεία της διείσδυσης του LNG στον ναυτιλιακό κλάδο, μέσω της επισκόπησης της αύξησης των κινούμενων με LNG πλοίων και της ανάπτυξης των σχετικών υποδομών. Επιπλέον, θα γίνει μία σύντομη επισκόπηση των διάφορων τροποποιήσεων που θα πρέπει να γίνουν σε ένα πλοίο προκειμένου να μπορέσει να λειτουργεί με LNG, όπως είναι η παρουσίαση των διάφορων τύπων δεξαμενών και κινητήρων που θα πρέπει να εγκατασταθούν.

1.2 Δομή και μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία δομείται ως εξής: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία πρώτη εισαγωγή στο θέμα, όπου παρουσιάζεται το LNG ως καύσιμο. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεσμικό πλαίσιο που είναι σε ισχύ, καθώς γίνεται και μία σύντομη ιστορική αναδρομή στα θεσμικά πλαίσια που ίσχυαν στο παρελθόν, σχετικά με τα όρια των εκπεμπόμενων αερίων που έχει θέσει ο IMO στον ναυτιλιακό κλάδο. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι διάφορες εναλλακτικές που παρουσιάζονται στους πλοιοκτήτες προκειμένου να συμμορφωθούν οι εκπομπές των πλοίων τους με τα πρότυπα του IMO. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι προοπτικές της χρήσης χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο καυσίμων, της χρήσης βιοκαυσίμων αλλά και της εγκατάστασης

πλυντρίδων, οι οποίες μειώνουν τα επίπεδα του εκπεμπόμενου θείου από τους κινητήρες των πλοίων. Το τέταρτο κεφαλαίο παρουσιάζει τους διάφορους τύπους δεξαμενών και κινητήρων που μπορούν να εγκατασταθούν για την χρήση του LNG ως καυσίμου σε ένα πλοίο, των διαδικασιών ανεφοδιασμού τέτοιων πλοίων, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται μία σύντομη περιγραφή των οικονομικών απαιτήσεων από τη μετασκευή ή ναυπήγηση ενός πλοίου που χρησιμοποιεί το LNG ως καύσιμο. Το υποενότητα 4.5 καταγράφονται οι πρόσφατες εξελίξεις στη χρήση του LNG στη διεθνή ναυτιλία καθώς και στην ανάπτυξη των λιμένων ανεφοδιασμού και των τερματικών παγκοσμίως. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση των συμπερασμάτων. Για τη συγγραφή της παρούσης εργασίας, διενεργήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικών βιβλίων, επιστημονικών άρθρων και διαδικτυακών πηγών.

Κεφάλαιο 2: Το LNG ως καύσιμο και θεσμικό πλαίσιο

2.1 International Maritime Organization και θεσμικό πλαίσιο για εκπομπές αερίων

Το έτος 2005 τέθηκαν σε ισχύ, αν και θεσπίστηκαν το 1997, οι κανονισμοί αναφορικά με την μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου και αζώτου που προκαλούνταν από τα πλοία, με βάση το παράρτημα VI της διεθνούς συνθήκης γνωστής ως Marpol. Έκτοτε, τα όρια όσον αφορά τις εκπομπές οξειδίων του θείου μειώνονται συνεχώς¹. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization – IMO) το 2008 είχε έθεσε ορισμένες δεσμεύσεις σε σχέση με τις αέριες εκπομπές των πλοίων, και ειδικότερα με τις εκπομπές οξειδίων του θείου και του αζώτου, καθώς και του διοξειδίου του άνθρακα και των αιωρούμενων σωματιδίων. Ο πίνακας 4 αποτυπώνει της κατηγοριοποίηση των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων. Σημειώνεται ότι τα οξείδια του θείου και του αζώτου δεν αποτελούν αέρια του θερμοκηπίου, δίχως αυτό να σημαίνει ότι η επίδρασή τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι λιγότερο σημαντική. Στα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται από τα πλοία συγκαταλέγονται το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο. Η συμπερίληψη του μεθανίου στα αέρια του θερμοκηπίου είναι ιδιαίτερος σημαντική, καθώς το μεθάνιο αποτελεί κύριο συστατικό στοιχείο του φυσικού αερίου, και κατά συνέπεια και του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Φυσικά, αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο είναι υπεύθυνα για την εμφάνιση και την όξυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, οδηγώντας σε υπερθέρμανση του πλανήτη και μια γενικότερη δραστική κλιματική αλλαγή.

Πίνακας 4. Κατηγοριοποίηση εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων

	Εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων	
	Ατμοσφαιρική ρύπανση	Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου
Εκπεμπόμενες ουσίες	Οξείδια του θείου (SO _x)	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)
	Οξείδια του αζώτου (NO _x)	Μεθάνιο (CH ₄)
	Αιωρούμενα σωματίδια (PM)	

¹ IMO, Sulphur 2020 – Cutting Sulphur Oxide Emissions, Διαθέσιμο εδώ: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>

Σκοπός των προτύπων που έχουν τεθεί από τον IMO είναι, μεταξύ άλλων, ο περιορισμός των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα σε ένα ποσοστό της τάξης του 50% έως και το 2050. Μία εκ των προτεινόμενων λύσεων, προκειμένου να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, είναι η υιοθέτηση του LNG ως καυσίμου στην πρόωση των πλοίων. Το LNG μπορεί να συνεισφέρει προς αυτόν τον στόχο, καθώς η καύση του φυσικού αερίου δεν απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα, όπως συμβαίνει στα υπόλοιπα συμβατικά ορυκτά καύσιμα κίνησης¹.

Όσον αφορά τώρα στη συμμόρφωση με τις επιταγές για περιορισμό των οξειδίων του θείου, ο IMO προτείνει γενικώς τις εξής πρακτικές²:

1. Χρήση ορυκτών καυσίμων με μικρή περιεκτικότητα σε θείο (μικρότερη από 0,50%)
2. Χρήση ορυκτών καυσίμων με μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο παράλληλα με την εγκατάσταση πλυντρίδων (scrubbers)
3. Χρήση εναλλακτικών καυσίμων, όπως για παράδειγμα του LNG ή βιοκαυσίμων

Το 2018 ανακοινώθηκε από τον IMO ένα μακροπρόθεσμο σχέδιο αναφορικά με την μείωση κάθε ρυπογόνας εκπομπής για τις μεταφορές μέσω θάλασσας. Ειδικότερα, από το 2020 δικαίωμα πλεύσης θα είχαν μονάχα τα πλοία τα οποία είτε θα χρησιμοποιούσαν καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, είτε θα είχαν εγκατεστημένο σύστημα πλυντρίδων, είτε θα αξιοποιούσαν κάποιο εναλλακτικό καύσιμο, όπως το LNG. Ως μακροπρόθεσμος στόχος τέθηκε η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από τις θαλάσσιες μεταφορές κατά 50% έως το 2050.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μία εκ των λύσεων για τη συμμόρφωση με τα πρότυπα του IMO είναι η χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Ωστόσο, αυτά τα καύσιμα τείνουν γενικώς να έχουν αυξημένη τιμή σε σχέση με τα καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο ή με το LNG. Αυτό σημαίνει ότι η στροφή σε τέτοιου τύπου καύσιμα πιθανότατα μακροπρόθεσμα είναι ασύμφορη για τους πλοιοκτήτες. Η δεύτερη εναλλακτική είναι η εγκατάσταση ενός συστήματος

¹ Ναυτεμπορική. (2018). LNG: Το Καύσιμο του Μέλλοντος – Μια Ρεαλιστική & Βιώσιμη Διέξοδος για το Τομέα της Ναυτιλίας. Διαθέσιμο Εδώ: <https://www.naftemporiki.gr/finance/story/1424019/lng-to-kausimo-tou-mellontos-mia-realistiki-kai-biosimi-dieksodos-gia-ton-nautiliako-tomea>

² IMO. (2020). Taking Bold Action to Clean up Shipping Emissions by Reducing the Sulphur Content in Ships' Fuel oil. Διαθέσιμο εδώ: https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/Sulphur%202020%202020-page%20flyer_draft_19-6-2019_online_final.pdf

πλυντρίδων, η οποία καθιστά δυνατή τη συνέχιση χρησιμοποίησης των φθηνότερων, με μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο, καυσίμων. Υπολογίζεται πως η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος έχει κόστος από 1 έως 5,7 εκατομμύρια δολάρια. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς, το κόστος αυτό είναι απαγορευτικό για πολλούς πλοιοκτήτες. Η τρίτη εναλλακτική είναι η χρησιμοποίηση εναλλακτικών καυσίμων, όπως είναι το LNG. Η υιοθέτηση του LNG ως καυσίμου στη ναυτιλία, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που φέρει σε σχέση με τα υπόλοιπα καύσιμα και τις υπόλοιπες εναλλακτικές, θα μελετηθούν σε επόμενες ενότητες. Σε αυτό το σημείο, θα πραγματοποιηθεί μία σύντομη επισκόπηση της διεύθυνσης του LNG ως καυσίμου στη ναυτιλία.

Σύμφωνα με στοιχεία της Equasis, ο συνολικός αριθμός εμπορικών πλοίων όλων των τύπων παγκοσμίως, ανερχόταν το 2020 σε 119.999 πλοία¹. Η Equasis λαμβάνει υπόψιν σκάφη κάθε χωρητικότητας, κατηγοριοποιώντας σε μικρά σκάφη (ολική χωρητικότητα – gross tonnage < 500), τα οποία αντιστοιχούν σε 55.172 σκάφη, σε μεσαία σκάφη (500 ≤ ολική χωρητικότητα < 25.000), τα οποία αντιστοιχούν σε 45.335 σκάφη, σε μεγάλα σκάφη (25.000 ≤ ολική χωρητικότητα < 60.000), τα οποία αντιστοιχούν σε 12.713 σκάφη, και σε πολύ μεγάλα σκάφη (ολική χωρητικότητα ≥ 60.000), τα οποία αντιστοιχούν σε 6.779 σκάφη. Σύμφωνα με στοιχεία της UNCTAD, ο συνολικός αριθμός πλοίων παγκοσμίως με ολική χωρητικότητα μεγαλύτερη από 100 το 2020 ανερχόταν σε 98.150 πλοία, 19,6% εκ των οποίων το 19,6% ήταν μεταφορές εμπορευματοκιβωτίων, το 17,3% πετρελαιοφόρα και το 17,1% σκάφη ανοιχτής θαλάσσης².

Σύμφωνα με στοιχεία της LNG-SEA, τον Ιανουάριο του 2020 υπήρχαν 195 εν λειτουργία πλοία με καύσιμο το LNG, ενώ ακόμη 110 ήταν υπό παραγγελία. Τον Ιανουάριο του 2021 τα εν λειτουργία πλοία έφτασαν τα 230, ενώ ακόμα 140 βρίσκονταν υπό παραγγελία. Το 2021 έκαναν την εμφάνισή τους και τα λεγόμενα «LNG ready» πλοία, δηλαδή πλοία που κινούνται με συμβατικό καύσιμο, αλλά είναι κατάλληλα, ώστε με ελάχιστες τροποποιήσεις, να χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο το LNG. Τα «LNG ready» πλοία ανέρχονταν σε 60³.

¹ Equasis (Electronic Wuality shipping Information System). (2020). The 2020 World Merchant Fleet. Διαθέσιμο εδώ:

<https://www.equasis.org/Fichiers/Statistique/MOA/Documents%20availables%20on%20statistics%20of%20Equasis/Equasis%20Statistics%20-%20The%20world%20fleet%202020.pdf>

² UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). (2020). Review of Maritime Transport. Διαθέσιμο εδώ: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020ch2_en.pdf

³ SEA-LNG. (2022). LNG – A Fuel in Transition. Διαθέσιμο εδώ: https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.pdf

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία για το 2021 συμπεραίνεται ότι οι προσπάθειες υιοθέτησης του LNG θα πρέπει να εντατικοποιηθούν, ούτως ώστε χρησιμοποιείται ως καύσιμο από ένα σημαντικό ποσοστό του παγκόσμιου στόλου και να καταστεί δυνατό να καταγραφεί σημαντική πρόοδος στους εκπεμπόμενους ρύπους, σύμφωνα με τα πρότυπα του IMO. Αν και η υιοθέτηση του LNG σημειώνει κάθε έτος σημαντική πρόοδο, από τα 98.150 πλοία με ολική χωρητικότητα πάνω από 100 το 2020, μόλις 230 (χρησιμοποιούνται στοιχεία του Ιανουαρίου 2021) εξ αυτών κινούνταν με LNG, αντιστοιχώντας σε ένα ποσοστό της τάξης του μόλις 0,0023%. Αν δε λάβουμε υπόψιν τα στοιχεία της Equasis, η οποία συνυπολογίζει πλοία κάθε ολικής χωρητικότητας και τα οποία αριθμούνταν σε 119.999 για το 2020, το ποσοστό αυτό μειώνεται στο 0,0019%. Αντιλαμβάνεται κανείς ότι το ποσοστό των πλοίων που κινούνται με LNG παραμένει εξαιρετικά μικρό συγκρινόμενο με τον παγκόσμιο εμπορικό στόλο, ούτως ώστε να δύναται να επιφέρει ουσιαστικά αποτελέσματα στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων από τον τομέα της ναυτιλίας συνολικά.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει μέχρι στιγμής δαπανήσει περισσότερα από 250 εκατομμύρια δολάρια για την ανάπτυξη σχετικών εφοδιασμού και αποθήκευσης LNG, υποδηλώνοντας τη διάθεσή της να προωθήσει το LNG ως μία εναλλακτική λύση για την πρόωση των πλοίων, η οποία θα επιτρέψει τη συμμόρφωση με τα πρότυπα του IMO.

2.2 Η ευκαιρία για το LNG: Σύμβαση MARPOL και καύσιμα

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί πολλές και ποικίλες ενέργειες που ως στόχο είχαν τον σημαντικό περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων στη ναυτιλία. Οι περισσότερες από αυτές τις ενέργειες ορίζονται στο παράρτημα VI της MARPOL. Η MARPOL αποτελεί μία διεθνή σύμβαση η οποία έχει αναπτυχθεί από τον IMO, και θεσπίζει σε νομικό επίπεδο τα διεθνή πρότυπα όσον αφορά στις εκπομπές ρύπων των πλοίων με τα οποία δεσμεύονται να συμβαδίζουν οι πλοιοκτήτες¹.

Το παράρτημα VI της MARPOL, το οποίο υιοθετήθηκε το έτος 1997 αλλά τέθηκε σε ισχύ το 2005, καταγράφει τους περιορισμούς που τίθενται στους βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους που

¹ MARPOL Annex VI. (2020). Prevention of Air Pollution from Ships. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.rempcc.org/en/knowledge-centre/online-catalogue/3-zb-l01-marpol-annex-vi-regulations-final.pdf>

περιέχουν τα καύσιμα των πλοίων, όπως είναι τα οξειδία του θείου και του αζώτου. Επιπλέον, τίθενται περιορισμοί σε κάθε ουσία όπου προκαλεί καταστροφή στη στιβάδα του όζοντος και παρέχει κατευθυντήριες οδηγίες για τις κατάλληλες ρυθμίσεις στη διαδικασία καύσης σε κάθε πλοίο¹.

Αρχικά, ως μέγιστο όριο στις εκπομπές οξειδίων του θείου στις περιοχές εκτός SECA οριζόταν το 4,5% κ.β. Το 2012 το όριο αυτό μειώθηκε στο 3,5%², ενώ από τη 1 Ιανουαρίου 2020 το νέο όριο τέθηκε στο 0,5%, με ισχύ για πλοία κάθε μεγέθους και για κάθε δρομολόγιο.

Στο Παράρτημα VI σημειώνεται επιπλέον η πρόβλεψη για τις ειδικές περιοχές όπου τα όρια για τις εκπομπές θείου είναι περισσότερο αυστηρά. Εξ αρχής, το όριο σε αυτές τις περιοχές είχε τεθεί στο 1,5%. Το 2010 το όριο αυτό μειώθηκε στο 1% και το έτος 2015 στο 0,1%³.

Πίνακας 5. Όρια θείου στις εκπομπές των κινητήρων των πλοίων σε περιοχές εντός και εκτός SECAs

Όριο εντός SECAs	Όριο εκτός SECAs
1,5%	4,5 %
1,0 % (εφαρμογή το 2010)	3,5 % (εφαρμογή το 2012)
0,1 % (εφαρμογή το 2015)	0,5 % (εφαρμογή το 2020)

Η οδηγία 2012/31 της Ε.Ε. αναφορικά με την περιεκτικότητα του θείου στα καύσιμα των πλοίων, αποτέλεσε σημείο αναφοράς για τον έλεγχο της εκπομπής των οξειδίων του θείου των πλοίων που πλέον σε ευρωπαϊκά ύδατα. Όσο τώρα αφορά στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, το σχετικό πλαίσιο στην Ευρώπη καθορίζεται από τον κανονισμό MRV, ο οποίος επιβάλλει τη συστηματική παρακολούθηση και την υποβολή σχετικής έκθεσης για κάθε πλοίο.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, σύμφωνα με το Marpol Anex VI, ο έλεγχος της εκπομπής των οξειδίων του θείου, η ρύθμιση της περιεκτικότητάς του καθώς και οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα από τα πλοία, ορίζεται από το κανονισμό DCS.

¹ Isalos. (2016). Ένας Οδηγός για τις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών. Διαθέσιμο Εδώ:

<https://www.isalos.net/2016/04/enas-odigos-gia-tis-emission-control-areas-ecas/>

² Κοτρίκλα. Α. (2015). Ναυτιλία & Περιβάλλον, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς MRV και DCS:

1. Για κάθε πλοίο απαιτείται η παρακολούθηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, της απόστασης που έχει διανύσει και του φορτίου που μεταφέρει
2. Απαιτείται η σύστημα ετήσιας σχετικής έκθεσης η οποία θα εγκρίνεται από κάποιον ανεξάρτητο οργανισμό και θα κατατίθεται στο κράτος του οποίου τη σημαία φέρει το πλοίο καθώς και στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Ο κανονισμός MRV τέθηκε σε ισχύ στη 1 Ιανουαρίου 2018 και αναμένεται να επιφέρει μείωση 2% στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα¹.

Τέλος, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου από τα πλοία καθορίζεται από τον κανονισμό 13 του παραρτήματος VI της σύμβασης MARPOL. Υπάρχουν τρία επίπεδα για τις εκπομπές, τα Tier I – III. Όσο πιο νέο είναι το πλοίο τόσο πιο αυστηρά είναι τα όρια. Τα επίπεδα εκπομπών έχουν ως εξής²:

1. Tier I: αφορά σε κάθε ντιζελοκινητήρα ισχύος άνω των 130 kW που είναι εγκαταστημένος σε πλοίο που έχει κατασκευαστεί από τη 1 Ιανουαρίου του 2000 ή σε κάθε ντιζελοκινητήρα άνω των 130 kW που υπέστη σημαντική μετατροπή από τη 1 Ιανουαρίου του 2000 και μετά. Οι επιτρεπόμενες εκπομπές των συνολικών σταθμισμένων οξειδίων του αζώτου, ανάλογα με την ταχύτητα του κινητήρα n , είναι:

- 17 g/kWh για $n < 130 rpm$
- $45 \cdot n^{-0,2} g/kWh$ για $130 rpm \leq n < 2000 rpm$
- 9,8 g/kWh για $n \geq 2000 rpm$

2. Tier II: αφορά σε μηχανές που έχουν εγκατασταθεί σε πλοία που έχουν κατασκευαστεί από την 1 Ιανουαρίου του 2011. Τα όρια των συνολικών σταθμισμένων οξειδίων του αζώτου, ανάλογα με την ταχύτητα του κινητήρα n , είναι:

- 14,4 g/kWh για $n < 130 rpm$

¹ Κοτρίκλα, Α. (2015) Ναυτιλία & Περιβάλλον, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

² DNV – GL, LNG Safety – Sufficient Safety Barriers Must be in Place in Order to Keep the Risk Within Acceptable Limits. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/lng-safety.html>

- $44 \cdot n^{-0,23} \text{ g/kWh}$ για $130 \text{ rpm} \leq n < 2000 \text{ rpm}$
 - $7,7 \text{ g/kWh}$ για $n \geq 2000 \text{ rpm}$
3. Tier III: περιλαμβάνει τα πιο αυστηρά όρια, τα οποία ισχύουν μόνο στις περιοχές SECA και αφορά σε μηχανές που έχουν εγκατασταθεί σε πλοία που έχουν κατασκευαστεί από την 1 Ιανουαρίου του 2016
- $3,4 \text{ g/kWh}$ για $n < 130 \text{ rpm}$
 - $9 \cdot n^{-0,2} \text{ g/kWh}$ για $130 \text{ rpm} \leq n < 2000 \text{ rpm}$
 - 2 g/kWh για $n \geq 2000 \text{ rpm}$

2.3 Σχεδιασμός, ασφάλεια και καταλληλότητα του LNG

Όσον αφορά στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων των συστημάτων LNG έχει πολύ μεγάλη σημασία η πιστοποίηση κάθε υλικού σε κρυογονικές θερμοκρασίες και η ενσωμάτωση λειτουργίας για την ανακούφιση της πίεσης. Κατά τον σχεδιασμό του πλοίου θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη μελέτη για την τοποθέτηση της δεξαμενής του καυσίμου LNG καθώς και όλου του συστήματος εξοπλισμού επεξεργασίας, των αγωγών του εξαερισμού, των πηνίων της ανακούφισης πίεσης και των λοιπών συστημάτων. Κάθε νέο πλοίο που κατασκευάζεται ή κάθε πλοίο που μετασκευάζεται θα πρέπει να ακολουθεί τις απαραίτητες προδιαγραφές, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού και του περιβάλλοντος. Εξαιρετικά σημαντική είναι επιπλέον η ευαισθητοποίηση του πλοίου σε σχέση με τους κινδύνους περιβαλλοντικής μόλυνσης και η κατάλληλη επιμόρφωση και εκπαίδευσή του¹.

Οι ναυτιλιακές εταιρείες θα πρέπει να εστιάσουν την προσοχή τους στα εξής²:

¹ DNV – GL, LNG Safety – Sufficient Safety Barriers Must be in Place in Order to Keep the Risk Within Acceptable Limits. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/lng-safety.html>

² DNV – GL, LNG as Ship Fuel – A Focus on the Current & Future use of LNG as Fuel in Shipping. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/index.html>

1. Κάθε δεξαμενή LNG έχει πολύ μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο
2. Υπάρχει πάντα ο κίνδυνος για έκρηξη σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διαρροή αερίου
3. Το καύσιμο LNG αποθηκεύεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες
4. Στο πλοίο υπάρχουν χώροι υψηλού, χαμηλού και μηδενικού κινδύνου
5. Το πλήρωμα θα πρέπει να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο και επιμορφωμένο σε σχέση με το καύσιμο LNG και την ασφαλή λειτουργία των σχετικών συστημάτων

Σύμφωνα με μελέτη που υπέβαλε η Φινλανδία στην επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος του IMO το 2016 αναφορικά με τις επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων από την εκπομπή των οξειδίων του αζώτου, αναμένεται οι πρόωροι θάνατοι από το έτος 2020 μέχρι το 2025 να αυξηθούν κατά 570.000, εάν δεν υπάρξει ουσιαστική μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου από τα πλοία¹.

Σύμφωνα με τον IMO, οι εκπομπές των οξειδίων του θείου σχετίζονται άμεσα με εγκεφαλικά επεισόδια, το άσθμα, τις καρδιαγγειακές νόσους, τον καρκίνο του πνεύμονα και τις πνευμονικές νόσους². Φυσικά, τα οξείδια του αζώτου και του θείου έχουν άμεση επίπτωση στο περιβάλλον.

Όσον αφορά στο διοξείδιο του άνθρακα, πέρα από την προφανή επίδραση στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων από την εμφάνιση πνευμονικών νόσων, έχει τη δυνατότητα να μετατραπεί σε θειικό οξύ, το οποίο μπορεί να προκαλέσει ακόμη και μείωση του pH της βροχής, οδηγώντας στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Η όξινη βροχή, αναλόγως με το pH καθώς και με το χρόνο της έκθεσης, έχει τη δυνατότητα να επιφέρει πολύ σοβαρές βλάβες στα φυτά, στο δέρμα των ανθρώπων, ενώ μπορεί ακόμα να προκαλέσει διάβρωση στα μέταλλα καθώς και να αλλοιώσει τα δομικά υλικά των κατασκευών, ειδικότερα των αρχαίων μνημείων³.

¹ IMO, Sulphur 2020 – Cutting Sulphur Oxide Emissions. Διαθέσιμο εδώ:

<https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>

² IMO. (2020). Taking Bold Action to Clean up Shipping Emissions by Reducing the Sulphur Content in Ships' Fuel oil. Διαθέσιμο εδώ: https://www.imo.org/en/MediaCentre/HofTopics/Documents/Sulphur%202020%202020-flyer_draft_19-6-2019_online_final.pdf

³ Κοτρίκλα, Α. (2015) Ναυτιλία & Περιβάλλον, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Ο πίνακας 6 είναι κατατοπιστικός όσον αφορά στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου και του αζώτου, του διοξειδίου του άνθρακα αλλά και των αιωρούμενων σωματιδίων. Η μείωση των εκπομπών αυτών σημαίνει και μείωση των επιδράσεών τους στο περιβάλλον και την υγεία των ανθρώπων.

Πίνακας 6. Επίπτωση στα επίπεδα εκπομπών από τη χρήση διαφόρων καυσίμων

	LNG	Αποστάγματα και καύσιμο LS	HFO και πλυντρίδες	HFO και SCR	Ηλεκτρισμός	Βιοκαύσιμα	Υδρογόνο	Μεθανόλη
PM	Σημαντική Μείωση	Μέτρια μείωση	Σημαντική μείωση	Μέτρια μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση
SO _x	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Αύξηση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική Μείωση
NO _x	Σημαντική μείωση	Καμία μεταβολή	Αύξηση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση
CO ₂	Μέτρια μείωση	Καμία μεταβολή	Αύξηση	Αύξηση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση	Σημαντική μείωση

Επεξεργασία δεδομένων από: Mr. Arthur McWhinnie, CSC Board Member & Chairman, Cyprus Shipping Chamber's Marine Committee, Managing Director, Bernhard Shulte Shipmanagement (Cyprus), Poseidon Med II, Ζωντανή ροή Poseidon Med II. Διαθέσιμο εδώ: https://www.youtube.com/watch?v=B_zCMmiaTHg

Ο πίνακας 6 παρουσιάζει την επίπτωση στις εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων, οξειδίων του θείου και αζώτου, και διοξειδίου του άνθρακα, για διάφορα καύσιμα. Παρατηρείται ότι ο ηλεκτρισμός, τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο και η μεθανόλη έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο στη μείωση αυτών των εκπομπών, αφού μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές σε κάθε κατηγορία αυτών. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του καυσίμου με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο (HFO) σε συνδυασμό με σύστημα πλυντρίδων. Πράγματι, το σύστημα πλυντρίδων μειώνει τα εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου (και τα εκπεμπόμενα αιωρούμενα σωματίδια) σε επίπεδα τόσο χαμηλά, ώστε να επιτυγχάνεται η συμμόρφωση με τα πρότυπα του IMO. Ωστόσο, τα εκπεμπόμενα διοξείδια του αζώτου και το διοξείδιο του άνθρακα, όχι μόνο δε μειώνονται, αλλά αυξάνονται κίελας. Αν και η υιοθέτηση του ηλεκτρισμού, των βιοκαυσίμων, του υδρογόνου ή της μεθανόλης ως καυσίμων στη ναυτιλία, μοιάζει, από τη σκοπιά των εκπεμπόμενων ρύπων, ως η ιδανικότερη επιλογή, το κόστος του εκάστοτε καυσίμου, η διαθεσιμότητά του, το κόστος της μεταφοράς και αποθήκευσής του, το κόστος των υποδομών καθώς και το κόστος της τεχνολογίας που απαιτεί,

καθιστά το LNG, παράλληλα με τη σημαντική μείωση που επιτυγχάνει στις εκπομπές των αιωρούμενων σωματιδίων, των οξειδίων του θείου και του αζώτου και τη μέτρια μείωση στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, την αποδοτικότερη και οικονομικά πιο βιώσιμη λύση. Με άλλα λόγια, αν ληφθούν υπόψιν όλοι οι παράγοντες, το LNG φαίνεται πως αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή για ναυτιλιακό καύσιμο¹.

¹ Mr. Arthur McWhinnie, CSC Board Member & Chairman, Cyprus Shipping Chamber's Marine Committee, Managing Director, Bernhard Shulte Shipmanagement (Cyprus), Poseidon Med II, Ζωντανή ροή Poseidon Med II. Διαθέσιμο εδώ: https://www.youtube.com/watch?v=B_zCMmiaTHg

Κεφάλαιο 3: Το LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο και άλλες επιλογές για τους πλοιοκτήτες

Οι απαιτήσεις για τη μείωση των εκπομπών από τα πλοία που θεσπίστηκαν από τον IMO το 2020 ισχύουν για πλοία 400 μικτών τόνων και άνω, τα οποία εκτιμάται ότι περιλαμβάνουν το 2022 περίπου 110.000 πλοία παγκοσμίως. Ωστόσο, οι αναλυτές αναφέρουν ότι πολλά από τα μικρότερα πλοία που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία ήδη χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα μικρότερα πλοία, μια εκτίμηση είναι ότι περίπου 55.000 πλοία καίνε επί του παρόντος καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Οι πλοιοκτήτες έχουν τρεις κύριες επιλογές για να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις εκπομπών του IMO με τους υπάρχοντες κινητήρες: τη χρησιμοποίηση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ή βιοκαυσίμων), την εγκατάσταση πλυντρίδρων (scrubbers), και την κατάλληλη μετατροπή των πλοίων για χρησιμοποίηση του LNG ως καυσίμου.

3.1 Καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο

Η απλούστερη επιλογή για τους πλοιοκτήτες, προκειμένου να συμμορφωθούν με τα πρότυπα του IMO για τις εκπομπές θείου, αλλά και η πιο δημοφιλής, είναι η στροφή σε χρήση μαζούτ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Αν και η μετάβαση σε καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο θα αύξανε το κόστος των καυσίμων σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, θα απαιτούνταν ελάχιστο ή μηδενικό αρχικό κόστος καθώς η υπάρχουσα υποδομή και τα ανεφοδιαστικά πλοία δεν απαιτούν περαιτέρω τροποποιήσεις. Αναμένοντας την ευρεία υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης, πολλοί αναλυτές προβλέπουν ότι η εφαρμογή των κανονισμών του IMO θα αυξήσει τη ζήτηση για καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και, ως εκ τούτου, θα αυξήσει σημαντικά την τιμή τέτοιου τύπου καυσίμων. Μια τέτοια τάση θα μπορούσε επίσης να μειώσει τη ζήτηση σε καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τη διαφορά στην τιμή μεταξύ των καυσίμων με χαμηλή και των καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Η μετάβαση σε καύσιμα χαμηλότερης περιεκτικότητας σε θείο θα μπορούσε να αυξήσει το κόστος καυσίμου σε ολόκληρη τη βιομηχανία κατά έως και 60 δισεκατομμύρια δολάρια, εάν πρόκειται

να υπάρξει πλήρης συμμόρφωση με τους νέους κανονισμούς του IMO¹. Επιπλέον, ενώ αυτή η μετάβαση μπορεί να επιτρέπει στους πλοιοκτήτες να συμβαδίζουν με τα πρότυπα του IMO όσον αφορά στις εκπομπές θείου, δε σημαίνει απαραίτητα ότι δε θα πρέπει να υπάρξει μετάβαση σε άλλου τύπου καύσιμα, όπως για παράδειγμα στο LNG ή άλλα εναλλακτικά καύσιμα, σε πιθανά μελλοντικά πρότυπα από τον IMO ειδικά όσον αφορά στα λεγόμενα αέρια του θερμοκηπίου, όπως είναι το CO₂.

3.2 Βιοκαύσιμα

Μια άλλη επιλογή για τους πλοιοκτήτες είναι η χρήση βιοκαυσίμων. Τα βιοκαύσιμα έχουν χαμηλά επίπεδα θείου και δυνητικά χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στον κύκλο ζωής τους, επομένως αποτελούν μια τεχνικά βιώσιμη λύση για την τήρηση των προτύπων εκπομπών του IMO.

Ωστόσο, σε μια επισκόπηση του ναυτιλιακού τομέα το 2017, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency - IEA) επισήμανε αρκετές προκλήσεις κατά την υιοθέτηση των βιοκαυσίμων ως καυσίμων στη ναυτιλία¹. Πρώτον, σημειώνονται χαμηλά επίπεδα τεχνογνωσίας όσον αφορά στο χειρισμό και τη χρήση βιοκαυσίμων στον ναυτιλιακό τομέα. Δεύτερον, ένα μόνο μεγάλο πλοίο μπορεί να καταναλώσει περί τα 25 εκατομμύρια γαλόνια σε ένα χρόνο, ποσότητα που αντιστοιχεί στην ετήσια παραγωγή από μια μονάδα μεσαίου μεγέθους βιοκαυσίμων. Προκύπτει κατά συνέπεια ότι τα βιοκαύσιμα είναι πιο πρακτικά και συνιστούν μια βιώσιμη λύση για μικρά πλοία ή για χρήση ως βοηθητικό καύσιμο. Τρίτον, μόνο το βιοντίζελ παράγεται επί του παρόντος σε επίπεδα που μπορούν να παρέχουν εμπορικά σημαντικούς όγκους καυσίμου. Τα καύσιμα με βάση τα φυτικά έλαια χρησιμοποιούνται επί του παρόντος ως βιοκαύσιμα αεριοθουμένων και μια ουσιαστική εισαγωγή τους στον ναυτιλιακό κλάδο θα οδηγούσε σε υψηλό ανταγωνισμό πρώτων υλών. Τέλος, το κόστος των βιοκαυσίμων είναι σημαντικά υψηλότερο από το κόστος των ορυκτών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, και αναμένεται να παραμείνει έτσι στο άμεσο μέλλον.

¹ Jordan, J., & Hickin, P. (2017). Tackling 2020: The Impact of the IMO and How Shipowners Can Deal with Tighter Sulfur Limits.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας περιγράφει διάφορες πολιτικές που μπορεί να καταστήσουν τα βιοκαύσιμα πιο ανταγωνιστικά στον ναυτιλιακό τομέα, όπως:

- Αυστηρότερα μέτρα για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από τον ναυτιλιακό κλάδο που θα μπορούσαν να αυξήσουν το σχετικό κόστος των συμβατικών καυσίμων σε σύγκριση με τα βιοκαύσιμα.
- Ρυθμιστικοί μηχανισμοί που αποσυνδέουν την τιμή των βιοκαυσίμων από τις παγκόσμιες τιμές του πετρελαίου, επιτρέποντας στους πλοιοκτήτες να αντισταθμίσουν το κόστος των καυσίμων στις τοπικές οικονομίες
- Δυνατότητα χρήσης των βιοκαυσίμων ως άμεσου υποκατάστατου των συμβατικών καυσίμων σε υπάρχοντες κινητήρες και συμβατότητα των βιοκαυσίμων με τις υπάρχουσες υποδομές διύλισης και διανομής.

3.3 Πλυντρίδες (scrubbers)

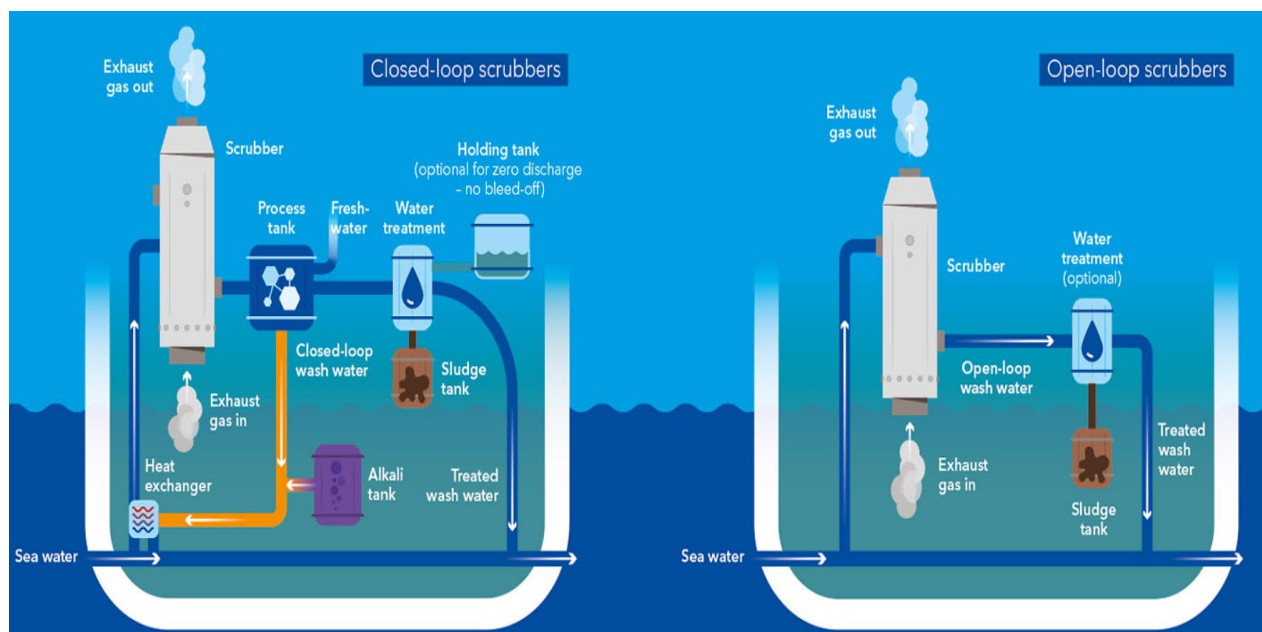
Οι πλυντρίδες είναι συστήματα που αφαιρούν το θείο από τις εκπομπές καυσαερίων των κινητήρων των πλοίων. Η πλυντρίδα ψεκάζει θαλασσινό ή γλυκό νερό αναμεμιγμένο με μια καυστική χημική ουσία στη ροή των καυσαερίων σε διάφορα στάδια. Ο ρύπος – κυρίως το διοξείδιο του θείου – αντιδρά με το αλκαλικό νερό, σχηματίζοντας θειικό οξύ.¹ Τα συστήματα πλυντρίδων διακρίνονται σε ανοιχτού τύπου, κλειστού τύπου και υβριδικού τύπου.

Τα συστήματα πλυντρίδων κλειστού βρόχου προσθέτουν χημικές ουσίες, όπως καυστική σόδα, στο νερό πλύσης για να ενισχύσουν την αλκαλικότητά του. Το νερό πλύσης στη συνέχεια ανακυκλώνεται μέσω του συστήματος και καθαρίζεται μερικώς. Οι πλυντρίδες ανοιχτού βρόχου χρησιμοποιούν θαλασσινό νερό, το οποίο είναι αλκαλικό από τη φύση του. Το προκύπτον νερό απορρίπτεται στη θάλασσα, εφόσον τηρούνται οι προϋποθέσεις που έχουν τεθεί από τον IMO.

¹ <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Scrubbers-at-a-glance.html#:~:text=Time%20is%20pressing%3B%20the%202020,ships%20with%20confirmed%20scrubber%20projects>.

Σε περιοχές και λιμάνια όπου απαγορεύεται η χρήση συστημάτων ανοιχτού βρόχου, τα πλοία χρησιμοποιούν συστήματα κλειστού βρόχου και συλλέγουν τη συσσωρευμένη ιλύ επί του σκάφους για μετέπειτα απόρριψη σε κατάλληλη λιμενική εγκατάσταση. Υπάρχουν επίσης υβριδικά συστήματα πλυντρίδων τα οποία μπορούν να λειτουργούν είτε ως κλειστού είτε ως ανοιχτού βρόχου, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία.

Τέλος, τα συστήματα των πλυντρίδων μπορούν να διαθέτουν πολλαπλές εισόδους, προσφέροντας τη δυνατότητα επεξεργασίας των καυσαερίων από πολλαπλούς κινητήρες, ενώ τα συστήματα με μία είσοδο μπορούν να επεξεργαστούν τα καυσαέρια από έναν κινητήρα τη φορά.



Εικόνα 1. Συστήματα πλυντρίδων κλειστού (αριστερά) και ανοιχτού βρόχου (δεξιά)¹

Ένα πλοίο το οποίο είναι εξοπλισμένο με πλυντρίδες θα είναι σε θέση να πληροί τις απαιτήσεις που τέθηκαν από τον IMO όσον αφορά στις εκπομπές θείου χρησιμοποιώντας παράλληλα καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. Η εκ των υστέρων τοποθέτηση μιας πλυντρίδας σε έναν υπάρχοντα κινητήρα μπορεί να κοστίσει αρκετά εκατομμύρια δολάρια, ενώ θα πρέπει συνυπολογιστούν και τα χαμένα έσοδα από τη διακοπή λειτουργίας του πλοίου για περίπου έναν

¹ <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Scrubbers-at-a-glance.html>

μήνα, όσο δηλαδή διαρκεί και η εγκατάσταση μιας πλυντρίδας. Ως εκ τούτου, αν και η χρήση πλυντρίδων θα επιτρέψει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς του IMO χρησιμοποιώντας φθινό καύσιμο με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, η απόσβεση από την επένδυση δεν αναμένεται να πραγματοποιηθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την μελέτη των Jordan & Hickin, στην περίπτωση ενός τυπικού δεξαμενόπλοιου, η εγκατάσταση πλυντρίδας θα μπορούσε να κοστίσει μέχρι και 4,2 εκατομμύρια δολάρια με χρόνο απόσβεσης περίπου 4,8 χρόνια¹. Σημειώνεται επίσης ότι οι ήδη εγκατεστημένες πλυντρίδες ενδέχεται να χρήσουν τροποποίησης, αναβάθμισης ή ακόμα και αντικατάστασης προκειμένου να υπάρξει συμμόρφωση με πιθανές μελλοντικές απαιτήσεις από τον IMO όσον αφορά στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου.

Ο ρυθμός υιοθέτησης της τεχνολογίας των πλυντρίδων θα μπορούσε να επηρεάσει τις οικονομικές επιπτώσεις όσον αφορά στο κόστος καυσίμων. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η χρήση πλυντρίδων αντισταθμίζει τελικώς το κόστος από την εγκατάστασή τους αλλά και από τα διαφυγόντα κέρδη κατά τη διάρκεια της εγκατάστασής τους, αφού επιτρέπει στους πλοιοκτήτες να χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα με υψηλά περιεκτικότητα σε θείο, τα οποία είναι εν γένει φθηνότερα. Καθίσταται σαφές ωστόσο ότι η οικονομική απόδοση της επένδυσης αυτής εξαρτάται από τη σχετική διαφορά στο κόστος των καυσίμων με χαμηλή και υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Η ζήτηση - και επομένως οι τιμές - για καύσιμα χαμηλής και υψηλής περιεκτικότητας σε θείο θα επηρεαστεί από το πόσα πλοία χρησιμοποιούν τα αντίστοιχα καύσιμα. Για παράδειγμα, η περιορισμένη υιοθέτηση των πλυντρίδων θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα περισσότερα σκάφη να επιζητούν καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, προκειμένου να συμβαδίζουν με τις οδηγίες του IMO, αυξάνοντας την πίεση στις τιμές των καυσίμων αυτών. Σε ένα τέτοιο σενάριο, οι πλυντρίδες θα παρείχαν μεγαλύτερη εξοικονόμηση κόστους στα καύσιμα για τα σκάφη που τις εγκατέστησαν. Από την άλλη, η εκτεταμένη υιοθέτηση των πλυντρίδων πιθανότητα θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη ζήτηση σε καύσιμα με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, ασκώντας και εν προκειμένω πίεση στις τιμές, μειώνοντας καθ' αυτόν τον τρόπο την απόδοση από την επένδυση σε πλυντρίδες².

¹ Jordan, J., & Hickin, P. (2017). Tackling 2020: The Impact of the IMO and How Shipowners Can Deal with Tighter Sulfur Limits.

² Van Rynbach, E. A., Briers, K. E., & DelGatto, N. J. (2018). Analysis of Fuel Alternatives for Commercial Ships in the ECA Era, Revision 6, Herbert Engineering Corp.

Δεδομένης της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει την προσφορά και τη ζήτηση στην αγορά των καυσίμων, είναι δύσκολο να προβλεφθεί ποιες ανακατατάξεις στην αγορά θα επιφέρει η εκτεταμένη εγκατάσταση πλυντρίδων ή πόσοι πλοιοκτήτες θα επιλέξουν να ακολουθήσουν αυτήν την πρακτική¹. Μέχρι και τα τέλη του 2018, είχαν εξοπλιστεί περίπου 660 πλοία με πλυντρίδες και περισσότερα από 600 πλοία βρίσκονταν στο στάδιο μετασκευής². Μέχρι το 2020, περίπου 2.000 είχαν εγκατεστημένες πλυντρίδες³. Ωστόσο, παρά την αυξανόμενη ζήτηση για την εν λόγω τεχνολογία, οι δυνατότητες εκτεταμένης εγκατάστασης αυτής παραμένει περιορισμένη· αναλυτές εκτιμούν ότι η μέγιστη δυναμική εγκατάστασης πλυντρίδων κυμαίνεται μεταξύ 300 και 500 πλοίων ετησίως.

3.4 Κινητήρες με καύσιμο LNG

Μια άλλη επιλογή για τους πλοιοκτήτες προκειμένου να συμμορφωθούν με τα πρότυπα του IMO είναι να στραφούν στη χρησιμοποίηση κινητήρων που χρησιμοποιούν το LNG ως καύσιμο. Τα πλοία που κινούνται με LNG εκπέμπουν μόνο ίχνη οξειδίων του θείου και συνεπώς η συμμόρφωση με τα πρότυπα του IMO είναι δεδομένη. Ως δευτερεύον όφελος, η χρήση του LNG ως καύσιμο κινητήρα θα μείωνε επίσης τις εκπομπές σωματιδίων (PM) σε σχέση με τους κινητήρες που χρησιμοποιούν καύσιμα είτε υψηλής είτε χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Ένα ακόμη πλεονέκτημα που προσφέρει το LNG ως καύσιμο στη ναυτιλία είναι η μειωμένη εκπομπή CO₂. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η χρήση του LNG μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερες εκπομπές μεθανίου, το οποίο συνιστά αέριο του θερμοκηπίου, καθώς αποτελεί κύριο συστατικό του φυσικού αερίου⁴.

Όσον αφορά στο κόστος από την εγκατάσταση ενός κινητήρα που τροφοδοτείται με LNG, αυτό μπορεί να αγγίξει μέχρι και τα 5 εκατομμύρια δολάρια στο συνολικό κόστος κατασκευής ενός

¹ Lasek, M. (2017). What Does IMO's 0.50% Sulphur Cap Decision Mean for the Bunker Supply Chain?. Ship and Bunker.

² Marine Log. (2018). Decision Time.

³ Libby, G., & Ghaddar, A. (2018). Shipping's 2020 Low Sulphur Fuel Rules Explained. Reuters.

⁴ Thomson, H., Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2015). Natural Gas as a Marine Fuel. Energy Policy, 87, 153-167.

νέου πλοίου¹. Η εγκατάσταση ενός τέτοιου κινητήρα σε ένα υπάρχον πλοίο φαντάζει ακόμη λιγότερο ελκυστική ως ιδέα, καθώς θα πρέπει να προβλεφθεί χώρος για τις μεγαλύτερες δεξαμενές που απαιτούνται. Στο συνολικό κόστος από την εγκατάσταση κινητήρων που λειτουργούν με καύσιμο LNG θα πρέπει να συνυπολογιστεί και η εκπαίδευση του πληρώματος.

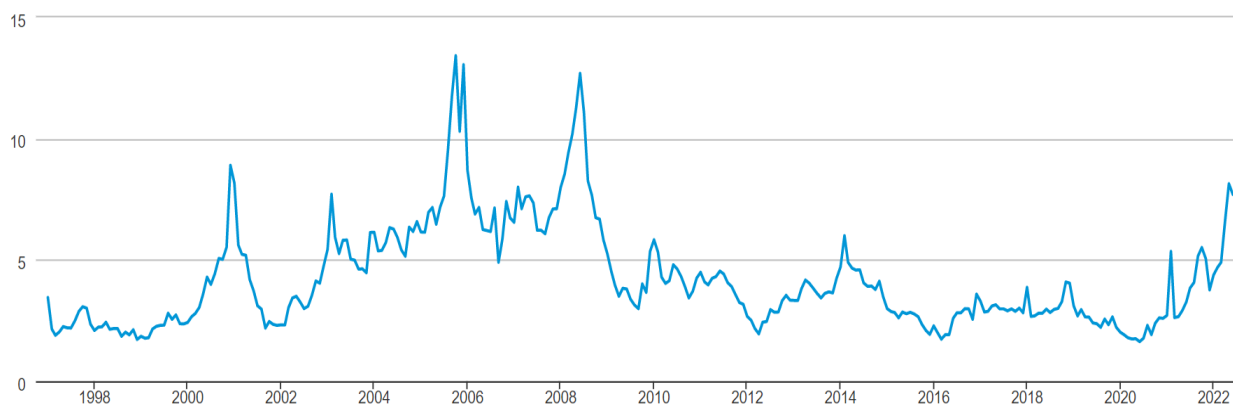
Σε κάθε περίπτωση, αν και η επένδυση σε έναν κινητήρα που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το LNG είναι σε πρώτο στάδιο δαπανηρή, θα πρέπει να σημειωθεί η σημαντική εξοικονόμηση κόστους στα καύσιμα, σε σχέση με τη χρησιμοποίηση συμβατικών καυσίμων με βάση το πετρέλαιο. Αυτή η εξοικονόμηση φυσικά θα εξαρτηθεί από τη διαφορά τιμής μεταξύ φυσικού αερίου και πετρελαίου - η οποία πάντως ήταν ασταθής τα τελευταία χρόνια ενώ σίγουρα επηρεάστηκε και από το σημαντικά γεγονός του 2022. Η επέμβαση της Ρωσίας στην Ουκρανία το 2022 έχει πυροδοτήσει μια μεγάλη κρίση στην ενέργεια με σημαντική πίεση στις αγορές του φυσικού αερίου.

3.5 Σύγκριση κόστους LNG και βασισμένων στο πετρέλαιο καυσίμων

Οι τάσεις της τελευταίας δεκαπενταετίας στον ενεργειακό τομέα υποδηλώνουν ότι το LNG μπορεί να είναι φθηνότερο μακροπρόθεσμα από τα καύσιμα πετρελαίου με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Οι τιμές του φυσικού αερίου στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2018 στο Henry Hub - τον μεγαλύτερο κόμβο εμπορίας φυσικού αερίου στις ΗΠΑ - παρουσίαζαν μέσο όρο περίπου 3 \$/MMBtu (εκατομμύρια βρετανικές θερμικές μονάδες), περίπου δηλαδή το 25% της μέσης τιμής μια δεκαετία πριν όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 1. Μέσα στο 2020 η τιμή παρουσίασε και άλλη μείωση, φτάνοντας μέχρι λίγο πάνω από τα 2 \$/MMBtu. Από εκεί και έπειτα, ακολουθήθηκε μία γενικά αυξητική πορεία, παρά ορισμένες απότομες μειώσεις, ώστε στις αρχές του 2022 η τιμή του φυσικού αερίου να φτάσει μέχρι και τα 7,8 \$/MMBtu².

¹ Saul, J. (2018). New Fuel Rules Push Shipowners to Go Green with LNG. Reuters. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.reuters.com/article/us-shipping-fuel-lng-analysis-idUSKBN1L0118>

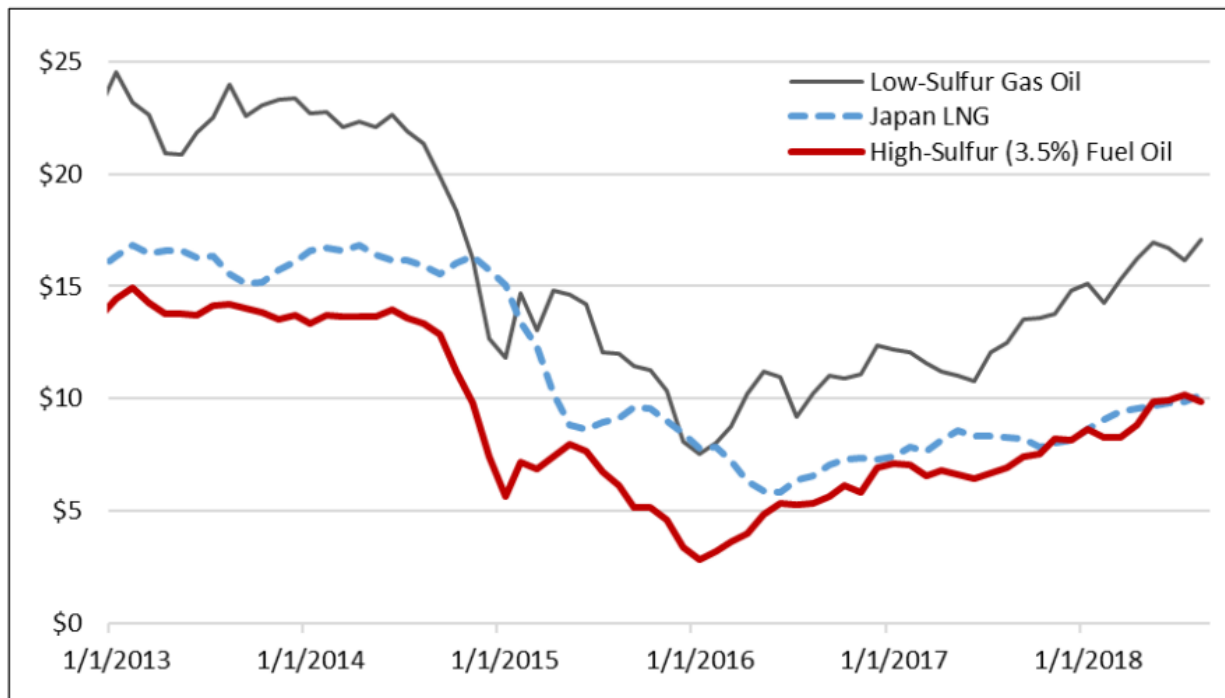
² U.S. Energy Information Administration. (2022). Henry Hub Natural Gas Spot Price. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>



Διάγραμμα 1. Μέση μηνιαία τιμή spot του φυσικού αερίου στο Henry hub των ΗΠΑ, σε δολάρια ανά MMBtu (Πηγή: U.S. Energy Information Administration. (2022). Henry Hub Natural Gas Spot Price. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>)

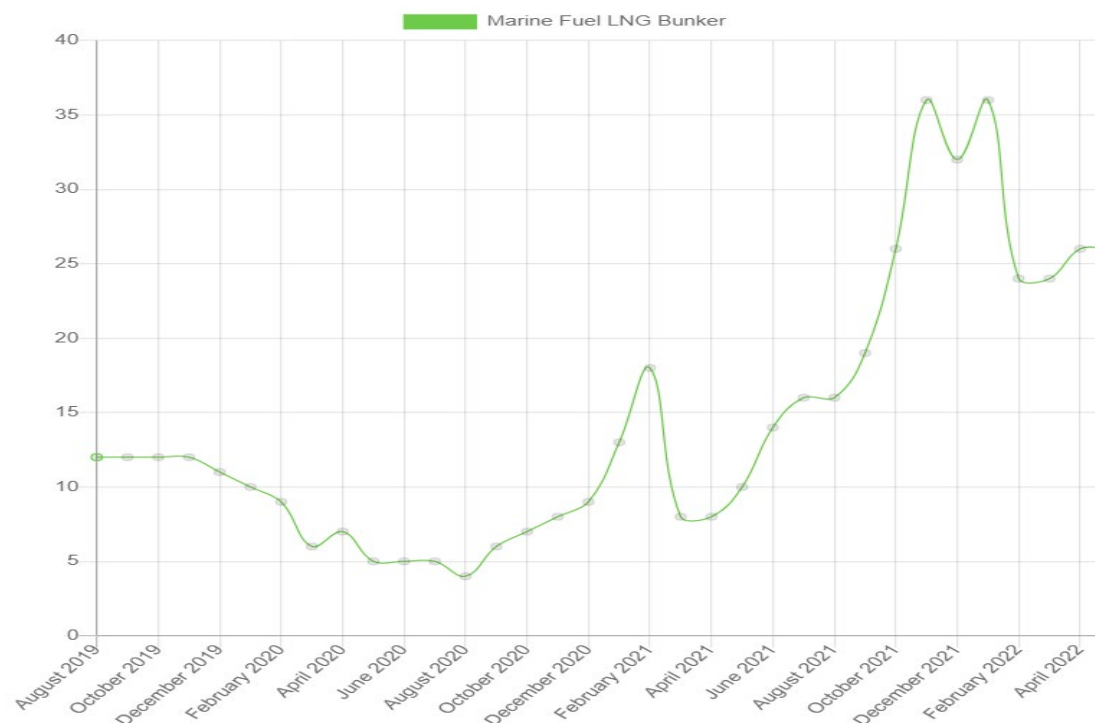
Η υγροποίηση του φυσικού αερίου προσθέτει περίπου 2 \$/MMBtu στο κόστος παραγωγής. Τα πρόσθετα τέλη του παραγωγού και το κόστος υπηρεσιών θα προσθέσει επιπλέον 2 \$/MMBtu. Η μεταφορά του LNG από τις Ηνωμένες Πολιτείες στην Ασία ή την Ευρώπη προσθέτει από \$1 έως \$2/MMBtu. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι αν το μέσος κόστος στο Henry Hub των Η.Π.Α. του φυσικού αερίου είναι 8 \$/MMBtu, το LNG που θα παραδοθεί σε κάποιο ευρωπαϊκό ή ασιατικό λιμάνι θα κοστίζει από 13 έως 14 \$/MMBtu υπό μακροπρόθεσμα συμβόλαια, ανάλογα βέβαια φυσικά πάντα με την περίοδο και την τοποθεσία¹. Υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές θα μπορούσαν να προκύψουν για συγκεκριμένα μακροπρόθεσμα συμβόλαια αλλά και στην αγορά spot του LNG (δηλαδή για μεμονωμένα φορτία), με βάση την τοποθεσία και το ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης τη δεδομένη χρονική στιγμή. Σε γενικές γραμμές, η αγορά των ΗΠΑ θα έχει τη χαμηλότερη τιμή για το LNG, ενώ η βόρεια Ασία την υψηλότερη λόγω της συγκριτικής έλλειψης εφοδιασμού φυσικού αερίου στην περιοχή και της απόστασης της περιοχής αυτές από τους προμηθευτές LNG.

¹ Timera Energy. (2018). Deconstructing LNG Shipping Costs. Διαθέσιμο εδώ: <https://timera-energy.com/deconstructing-lng-shipping-costs/>.



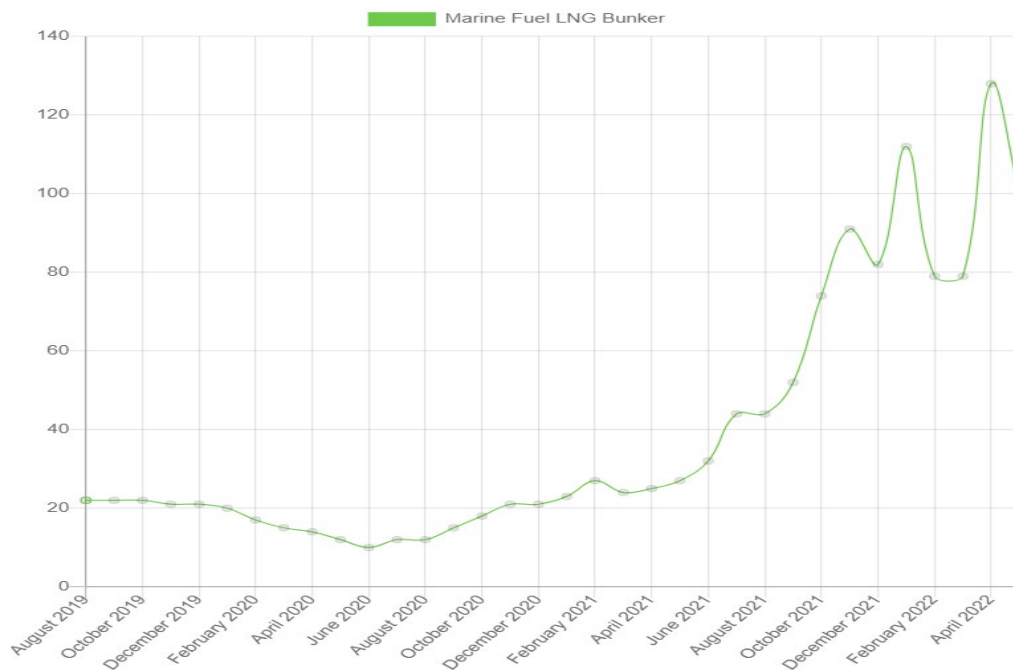
Διάγραμμα 2. Σύγκριση των ναυτιλιακών καυσίμων σε λιμάνια της Ιαπωνίας, σε δολάρια ανά MMBtu (Πηγή: Global LNG Hub. (2019). LNG as a Maritime Fuel: Prospects and Policy. Διαθέσιμο εδώ: <https://globallnghub.com/report-presentation/lng-as-a-maritime-fuel-prospects-and-policy>)

Το διάγραμμα 2 συγκρίνονται οι τιμές spot του LNG στην αγορά της Ιαπωνίας – όπου παρατηρείται γενικώς η υψηλότερη τιμή spot LNG - με τις τιμές spot για δύο κοινά καύσιμα με βάση το πετρέλαιο, το πετρέλαιο εσωτερικής καύσης χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και το μαζούτ υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. Όπως δείχνει το διάγραμμα, το Ιαπωνικό LNG ήταν γενικά φθηνότερο από το καύσιμο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και πιο ακριβό από το καύσιμο με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Ωστόσο, οι τιμές του LNG και των καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο συνέκλιναν το 2018. Οι τιμές spot του LNG στην αγορά της Ιαπωνίας έπεσαν κάτω από 6 \$/MMBtu το 2016, όταν το 2013 σημείωνε τιμές πάνω από 16\$/MMBtu.

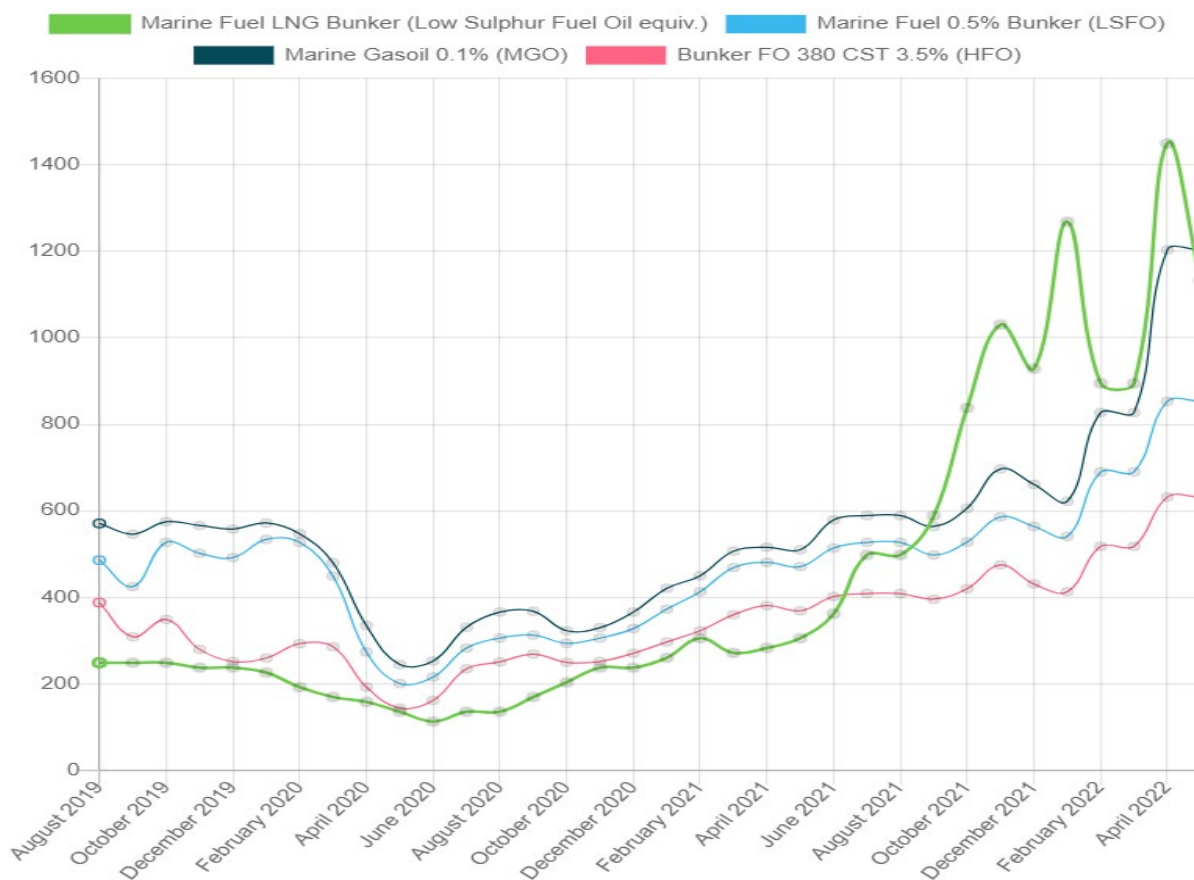


Διάγραμμα 3. Μέση μηνιαία τιμή του LNG στο λιμάνι της Σιγκαπούρης, σε δολάρια ανά MMBtu
(Πηγή: <https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/singapore-lng-bunker-prices/>)

Τον Ιανουάριο του 2018 η τιμή του LNG στην αγορά της Ιαπωνίας ήταν περίπου 8 \$/MMBtu, ενώ στο Henry Hub των ΗΠΑ η τιμή αυτή δεν ξεπερνούσε τα 4 \$/MMBtu. Σύμφωνα με το διάγραμμα 3 που δείχνει την τιμή του LNG στο λιμάνι της Σιγκαπούρης, αυτή τον Αύγουστο του 2019 άγγιξε τα 12 \$/MMBtu. Ακολούθησε μία πτώση στην τιμή, η οποία έφτασε μέχρι και τα 4,5 \$/MMBtu τον Αύγουστο του 2020, για να ακολουθήσει μία μεγάλη αύξηση τον Φεβρουάριο του 2021, φτάνοντας περίπου στα 18 \$/MMBtu. Θα ακολουθήσει μία πρόσκαιρη πτώση της τιμής, η οποία θα ακολουθηθεί από μία δραματική αύξηση, ξεπερνώντας μάλιστα τα 35 \$/MMBtu στο διάστημα μεταξύ Οκτωβρίου 2021 και Ιανουαρίου 2022. Από εκεί και πέρα, η τιμή του LNG θα ξαναμειωθεί, μέχρι τον Μάρτιο του 2022, όπου και η επέμβαση της Ρωσίας στην Ουκρανία θα λάβει χώρα, οδηγώντας και πάλι σε αύξηση της τιμής. Παρόμοια διακύμανση των τιμών παρατηρείται και στο λιμάνι του Ρότερνταμ, όπως παρουσιάζει και το διάγραμμα 4, με την τιμή του LNG να δίδεται σε €/MWh.



Διάγραμμα 4. Μέση μηνιαία τιμή του LNG στο λιμάνι του Ρότερνταμ, σε ευρώ ανά MW
(Πηγή: <https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/rotterdam-marine-fuel-lng-bunker-prices/>)

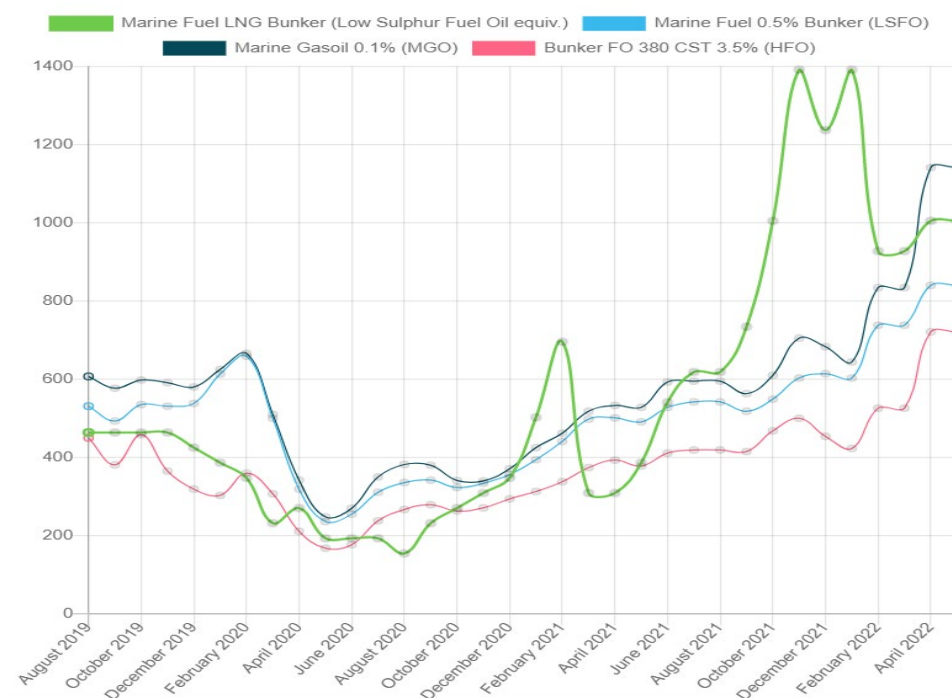


Διάγραμμα 5. Μέση μηνιαία τιμή διάφορων τύπων καυσίμων στο λιμάνι του Ρότερνταμ, σε ευρώ ανά mt (Πηγή: <https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/rotterdam-marine-fuel-lng-bunker-prices/>)

Τα διαγράμματα 5 και 6 συγκρίνουν τα μέσα μηνιαία κόστη των διάφορων ναυτιλιακών καυσίμων στα λιμάνια της Σιγκαπούρης και του Ρότερνταμ. Παρατηρούμε ότι λιμάνι του Ρότερνταμ η τιμή του LNG παρέμενε σταθερά χαμηλότερη σε σχέση με τα υπόλοιπα καύσιμα, είτε υψηλής είτε χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, η εικόνα αντιστρέφεται πλήρως από τον Ιούνιο του 2021 και έπειτα, όπου η τιμή του LNG συνεχώς αυξάνεται και καταλήγει να υπερβαίνει μέχρι και την τιμή των καυσίμων με περιεκτικότητα 0,1% σε θείο. Σημειώνεται πως ανοδική πορεία ακολουθούν οι τιμές όλων των καυσίμων γενικώς. Όσον αφορά στο λιμάνι της Σιγκαπούρης, μέχρι και τον Δεκέμβριο του 2020, οι τιμές του LNG είναι χαμηλότερες από τα καύσιμα με περιεκτικότητα 0,1 και 0,5% σε θείο, ενώ υπάρχουν διαστήματα που το LNG είναι φθηνότερο ακόμα και από το καύσιμο με περιεκτικότητα 3,5% σε θείο. Ωστόσο, από και έπειτα, και με μία πρόσκαιρη πτώση της τιμής την περίοδο Μαρτίου και Απριλίου του 2021, η τιμή του LNG είναι συνεχώς ανοδική

ενώ φτάνει μέχρι και τα 1400 \$/mt τον Νοέμβριο του 2021 και τον Ιανουάριο του 2022, όταν τον Αύγουστο του 2020 η αντίστοιχη τιμή ήταν χαμηλότερη και από 200 \$/mt. Αναμφίβολα, η ανοδική τάση της τιμής του LNG στις αγορές οφείλεται εν μέρει και στην υιοθέτηση των προτύπων του IMO που επιβάλλουν τον σημαντικό περιορισμό των εκπομπών σε θείο στη ναυτιλία.

Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές του LNG καθορίζονται από τα υφιστάμενα και τα μελλοντικά πρότυπα που επιβάλλει ο IMO, τα οποία άμεσα καθορίζουν τη ζήτηση σε LNG, από τη μεταβλητότητα ανά περιοχή, καθώς εν αντιθέσει με την αγορά του πετρελαίου η οποία είναι παγκόσμια, οι αγορές του φυσικού αερίου είναι τοπικές, αλλά και στη διαφοροποίηση μεταξύ της spot τιμής του LNG και του LNG που πωλείται ως ναυτιλιακό καύσιμο στα λιμάνια. Τα επιπλέον έξοδα που συσχετίζονται με το μάρκετινγκ, την αποθήκευση και τη μεταφορά του LNG στις εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού απαιτεί τη χρέωση έξτρα κόστους, πάνω από την τιμή spot. Η επιπλέον αυτή χρέωση είναι πιθανό να διαφέρει από λιμένα σε λιμένα.



Διάγραμμα 6. Μέση μηνιαία τιμή διάφορων τύπων καυσίμων στο λιμάνι της Σιγκαπούρης, σε δολάρια ανά mt

(Πηγή: <https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/singapore-lng-bunker-prices/>)

Κεφάλαιο 4: Υποδομές για τη χρήση του LNG ως καυσίμου στη ναυτιλία

4.1 Διαδικασίες ανεφοδιασμού

Οι διαδικασίες ανεφοδιασμού περιλαμβάνουν όλες εκείνες τις απαραίτητες ενέργειες που πρέπει να εκτελεστούν προκειμένου ικανή ποσότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου να μεταφερθεί στη δεξαμενή καυσίμων του πλοίου. Κάθε πλοίο, φυσικά, έχει διαφορετικές απαιτήσεις σε καύσιμα, και συχνά, ανάλογα με τις απαιτήσεις αυτές, επιλέγεται και η κατάλληλη μέθοδος εφοδιασμού. Ο πίνακας 7 παρουσιάζει μερικές ενδεικτικές τιμές εβδομαδιαίας κατανάλωσης LNG για μερικούς επιλεγμένους τύπους πλοίων.

Πίνακας 7. Ενδεικτική κατανάλωση LNG για επιλεγμένους τύπους πλοίων

Τύπος πλοίου	KW	M3/εβδομάδα
Οχηματαγωγό	12.000	400
Επιβατηγό – Οχηματαγωγό	20.000	700
Ταχύπλοο	25.000	900

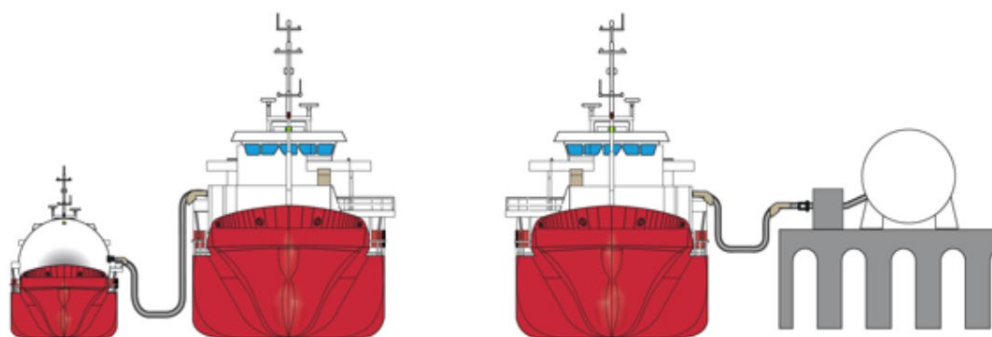
Επεξεργασία δεδομένων από: Χαβιάρης, Ι. (2014). Η εφαρμογή LNG ως καυσίμου σε πλοία Ro-Pax. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/6999>

Ο ανεφοδιασμός των πλοίων μπορεί να συμβαίνει μέσω τριών μεθόδων:

- **Εφοδιασμός από βυτιοφόρο όχημα (truck-to-ship):** Συνιστά τον πιο διαδεδομένο τρόπο εφοδιασμού. Στα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου περιλαμβάνονται το χαμηλό κόστος της σχετικής επένδυσης και η δυνατότητα χρήσης των βυτιοφόρων οχημάτων για άλλους σκοπούς (π.χ. διανομή του LNG στο εθνικό σύστημα από τους τερματικούς). Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι αποδοτική μόνον για εφοδιασμό ποσοτήτων μέχρι 50 τόνων, λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας των βυτιοφόρων. Επιπλέον, απαιτείται σύνδεση του σημείου ελλιμενισμού του πλοίου με το οδικό δίκτυο, ενώ η παρουσία του βυτιοφόρου μπορεί να παρακωλύσει άλλες δραστηριότητες, όπως για παράδειγμα την εκφόρτωση ή

φόρτωση εμπορευμάτων. Ως εκ τούτου, ο ανεφοδιασμός των πλοίων μέσω βυτιοφόρου είναι κατάλληλος για μικρότερα πλοία που έχουν περιορισμένη δυνατότητα αποθήκευσης καυσίμων, όπως είναι τα ρυμουλκά πλοία, τα πλοία εσωτερικής ναυσιπλοΐας, τα πλοία της ακτοφυλακής και άλλα μικρότερα επιβατηγά πλοία.

- **Εφοδιασμός από φορηγίδες ή μικρότερα εφοδιαστικά πλοία (ship-to-ship):** ο εφοδιασμός από κάποιο εφοδιαστικό πλοίο μπορεί να συμβεί είτε εν πλω, είτε κατά τον ελλιμενισμό του προς εφοδιασμό πλοίου. Αυτή η μέθοδος εφοδιασμού προσφέρει μεγάλη ευελιξία, καθώς δεν απαιτεί τον ελλιμενισμό τους προς εφοδιασμό πλοίου. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται το υψηλό κόστος επένδυσης για ένα εφοδιαστικό πλοίο. Προφανώς, ο εφοδιασμός από άλλα πλοία είναι κατάλληλος για κάθε τύπο πλοίου, ωστόσο η ευελιξία που προσφέρει καθιστά την τροφοδοσία οχηματαγωγών, οχηματαγωγών-επιβατηγών, μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και άλλων φορηγών πλοίων.
- **Εφοδιασμός από εγκαταστάσεις ξηράς μέσω σταθερών εφοδιαστικών γραμμών (shore-to-ship):** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ευρέως σε λιμάνια, όπου υφίσταται σταθερή ζήτηση για εφοδιασμό σε LNG. Ο ρυθμός εφοδιασμού είναι επίσης ο ταχύτερος. Ωστόσο, δεδομένου ότι απαιτείται ελλιμενισμός, η μέθοδος δεν προβλέπεται για ανεφοδιασμό μεγάλων πλοίων, καθώς απαιτείται περισσότερος χρόνος και χώρος που μπορεί να μην είναι διαθέσιμος σε έναν λιμένα.



Εικόνα 2. LNG bunkering: ανεφοδιασμός από πλοίο (αριστερά), ανεφοδιασμός σε λιμάνι (δεξιά)¹

¹ <https://www.seanews.co.uk/shipping-news/lng-bunkering-gaining-momentum/>



Εικόνα 3. LNG bunkering: ανεφοδιασμός από βυτιοφόρο όχημα¹

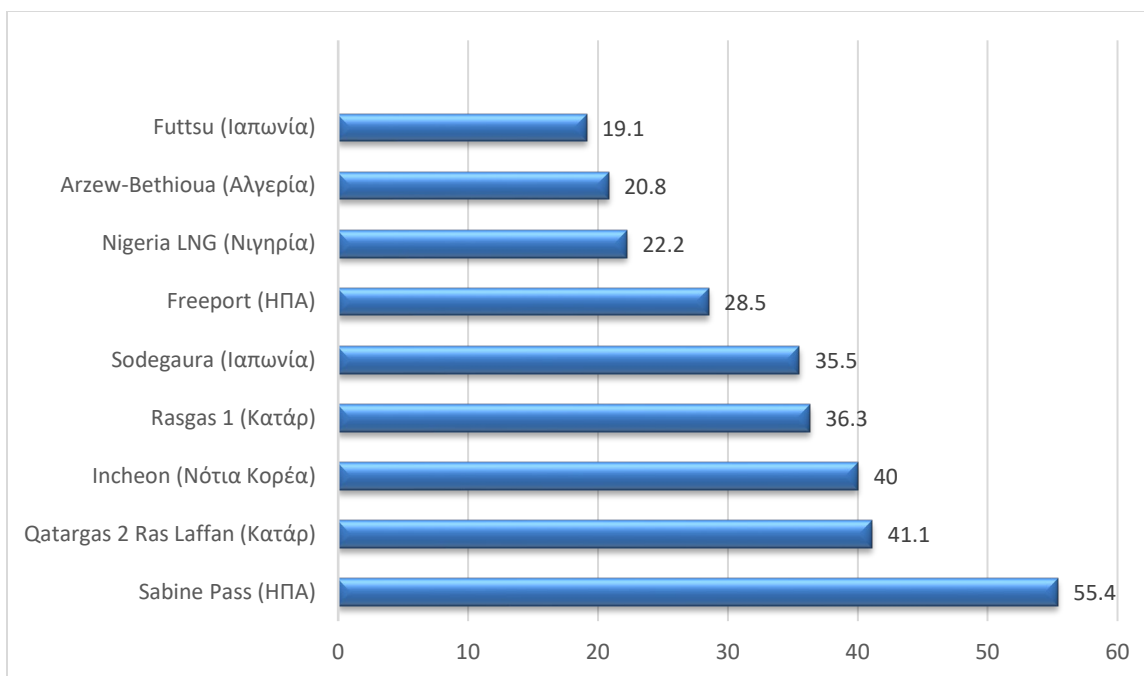
4.2 Λιμενικές υποδομές

Οι αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με τον αντίκτυπο των παραδοσιακών καυσίμων στο περιβάλλον οδηγούν όλο και περισσότερες ναυτιλιακές εταιρείες να στραφούν στη χρήση του LNG ως καυσίμου. Η αυξανόμενη αυτή ζήτηση επέβαλλε την ανάπτυξη κατάλληλων εγκαταστάσεων σε πολλούς μεγάλους εμπορικούς κόμβους και λιμάνια παγκοσμίως. Μέχρι και τον Ιανουάριο του 2022 είχαν κατασκευαστεί-μετατραπεί 141 υποδομές σε λιμένες παγκοσμίως, ενώ αναμένεται ο αριθμός αυτός να αυξηθεί σε 170 μέχρι το τέλος του έτους².

Ενώ η Ευρώπη διαθέτει τα περισσότερα λιμάνια ανεφοδιασμού LNG, τα οποία εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της ηπείρου, τέτοιες εγκαταστάσεις αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς και στη Νοτιοανατολική Ασία και στις ΗΠΑ. Μία από τις πιο πρόσφατες χώρες που ανέπτυξαν εγκαταστάσεις LNG είναι η Ιαπωνία, η οποία στοχεύει να μετατραπεί σε διεθνή κόμβο ανεφοδιασμού καυσίμων μέσω εγκαταστάσεων ξηράς στον κόλπο του Τόκιο και στο λιμάνι της Γιοκοχάμα.

¹ https://www.osakagas.co.jp/en/whatsnew/1262289_11885.html

² https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.

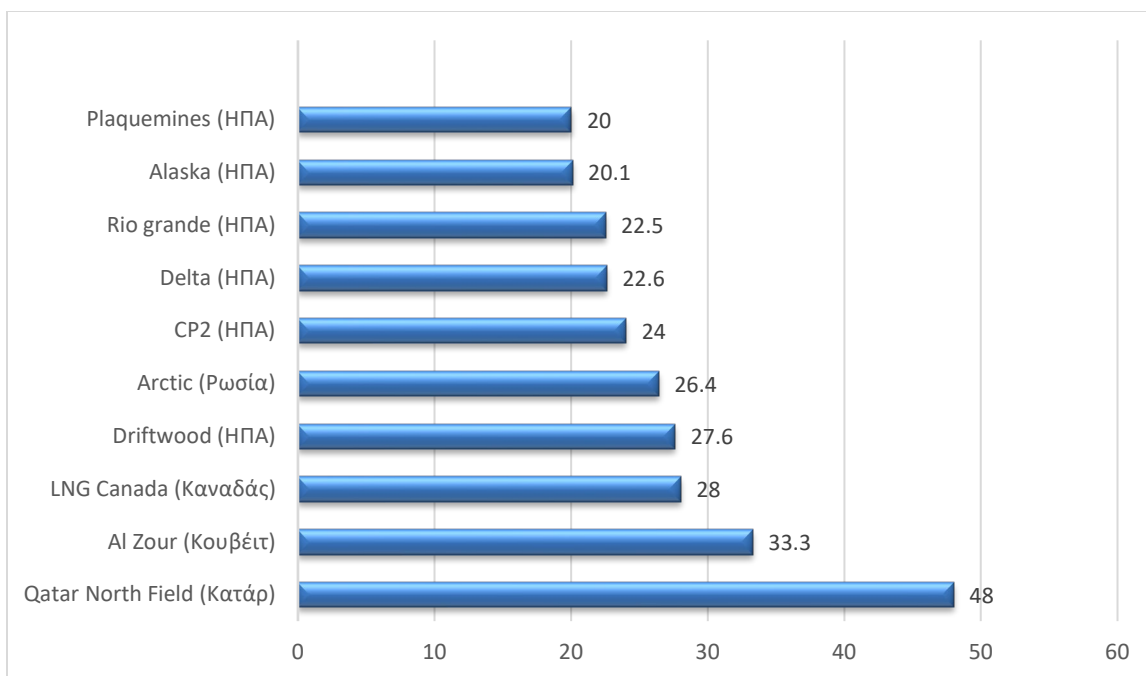


Διάγραμμα 7. Μεγαλύτεροι σε χωρητικότητα τερματικοί σταθμοί LNG παγκοσμίως, Σεπτέμβριος 2021 (σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους / έτος)

(Επεξεργασία δεδομένων από: Statista. (2022). Largest operational liquefied natural gas terminals by capacity worldwide as of 2021. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.statista.com/statistics/1263935/largest-operational-lng-terminals-by-capacity-worldwide/>)

Το διάγραμμα 7 παρουσιάζει τους μεγαλύτερους ανά χωρητικότητα τερματικούς σταθμούς LNG παγκοσμίως. Ως τερματικός σταθμός LNG ορίζεται η λιμενική εγκατάσταση στην οποία πραγματοποιούνται μία σειρά από δραστηριότητες, όπως εκφορτώσεις από δεξαμενόπλοια που μεταφέρουν LNG, επαναεριοποιήσεις κ.ά. Στους τερματικούς σταθμούς LNG, το υγροποιημένο φυσικό αέριο μετατρέπεται ξανά σε αέρια κατάσταση (επαναεριοποίηση) μετά την εκφόρτωση και στη συνέχεια διανέμεται σε όλο το δίκτυο. Η λειτουργία ενός τερματικού σταθμού LNG μπορεί να εντοπιστεί κυρίως σε τέσσερις δραστηριότητες:

- Ελλιμενισμός δεξαμενόπλοιων και εκφόρτωση ή επαναφόρτωση φορτίων
- Αποθήκευση LNG σε κρυγονικές δεξαμενές (-160°C)
- Επαναεριοποίηση
- Διανομή στο εθνικό δίκτυο



*Διάγραμμα 8. Μεγαλύτεροι σε χωρητικότητα υπό κατασκευή ή συζήτηση τερματικοί σταθμοί LNG παγκοσμίως, Σεπτέμβριος 2021 (σε εκατομμύρια μετρικούς τόνους / έτος)
(Επεξεργασία δεδομένων από: Statista. (2022). Largest liquefied natural gas terminals in construction or proposal stage worldwide as of 2021, by capacity. Διαθέσιμο εδώ:
<https://www.statista.com/statistics/1251661/largest-lng-terminals-proposed-or-in-construction-worldwide/>)*

Ο μεγαλύτερος τερματικός σταθμός LNG βρίσκεται στις ΗΠΑ, φέρει το όνομα Sabine Pass και έχει χωρητικότητα 55,4 μετρικούς τόνους / έτος. Μεγάλοι τερματικοί εντοπίζονται επίσης στο Κατάρ, τη Νότια Κορέα, την Ιαπωνία, την Αλγερία, την Νιγηρία, ενώ υπό κατασκευή βρίσκονται επίσης τερματικοί στο Κουβέιτ, τον Καναδά και τη Ρωσία.

4.3 Διαμόρφωση πλοίων για αξιοποίηση LNG

Προκειμένου να αξιοποιηθεί το LNG ως καύσιμο στη ναυτιλία, θα πρέπει είτε να ναυπηγηθούν νέα πλοία, τα οποία θα είναι εξ αρχής κατάλληλα διαμορφωμένα και εξοπλισμένα, είτε να μετασχηματιστούν και να μετασκευαστούν τα ήδη υπάρχοντα πλοία κατάλληλα. Γενικώς, η μετασκευή ενός πλοίου είναι απαιτητικότερη, όσον αφορά στην τεχνογνωσία και τους οικονομικούς και χρονικούς πόρους. Προκειμένου να ληφθεί η απόφαση μετασκευής ενός ήδη

υπάρχοντος πλοίου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν διάφοροι παράγοντες. Πλοία με ηλικία μεγαλύτερη των 20 ετών δεν ενδείκνυνται προς μετασκευή, καθώς δε δύνανται να πραγματοποιηθεί η απόσβεση μέσα στο ήδη περιορισμένο χρονικό πλαίσιο ζωής του πλοίου.

Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι μετρήσεις CAPEX (Capital Expenditure) και OPEX (Operating Expenses), ή αλλιώς οι κεφαλαιουχικές δαπάνες και τα λειτουργικά κόστη, αντίστοιχα¹. Με τον όρο κεφαλαιουχικές δαπάνες αναφερόμαστε στους οικονομικούς πόρους που δαπανώνται από έναν οργανισμό ή μια εταιρική οντότητα για την αγορά ή την αναβάθμιση περιουσιακών στοιχείων, όπως είναι τα κτίρια, τα οχήματα, ο εξοπλισμός, οι εκτάσεις γης, ή στην περίπτωση μας, τα πλοία. Η δαπάνη χαρακτηρίζεται ως κεφαλαιουχική συνεπώς όταν χρησιμοποιείται για την αγορά ενός περιουσιακού στοιχείου ή για την παράταση της ωφέλιμης ζωής ενός υπάρχοντος περιουσιακού στοιχείου. Τα λειτουργικά κόστη από την άλλη είναι εγγενή στη λειτουργία του περιουσιακού στοιχείου. Οι δείκτες αυτοί θα πρέπει να προβλεφθούν και μελετηθούν καλά, προκειμένου να ληφθεί η απόφαση σε σχέση με την μετασκευή ή την αγορά ενός πλοίου που χρησιμοποιεί καύσιμο LNG. Επισημαίνεται, πως παράλληλα θα πρέπει να αναβαθμιστούν οι λιμενικές εγκαταστάσεις, ούτως ώστε να μπορούν να φιλοξενούν τέτοιου είδους πλοία, αλλά και να εκπαιδευτεί κατάλληλα το πλήρωμα².

Όπως αντιλαμβάνεται κανείς, η αξιοποίηση του LNG ως καυσίμου απαιτεί σημαντικές διαφοροποιήσεις. Για παράδειγμα, απαιτούνται μεγαλύτερες δεξαμενές και ειδικές μηχανές, εξατμίσεις και σωληνώσεις. Στις 2 υποενότητες που ακολουθούν, 4.3.1 και 4.3.2 θα μελετηθούν οι τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν όσον αφορά στις δεξαμενές και τους κινητήρες των πλοίων.

4.3.1 Δεξαμενές αποθήκευσης LNG

Οι δεξαμενές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση του LNG σε πλοία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως πρισματικές, σφαιρικές και κυλινδρικές, αλλά και ως δεξαμενές

¹ Ross, S. (2021). CAPEX vs. OPEX: What's the Difference? Investopedia. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.investopedia.com/ask/answers/112814/whats-difference-between-capital-expenditures-capex-and-operational-expenditures-opex.asp>

² Πατέρα, Κ. (2018). Φυσικό αέριο στη ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο εδώ: <https://hellenicus.lib.aegean.gr/handle/11610/19920>

μεμβράνης και ανεξάρτητες. Οι δεξαμενές μπορούν είτε να βρίσκονται στο κατάστρωμα, είτε στο εσωτερικό του πλοίου. Ο πιο ευρεία χρησιμοποιημένος τύπος δεξαμενής είναι τύπου C με μόνωση κενού.

Οι πρισματικές δεξαμενές δέχονται πίεση μέχρι και 0,7 bar, απαιτούν μεγάλο χώρο εγκατάστασης, έχουν χωρητικότητα μεγαλύτερη από 5.000 m³ και υψηλό κόστος κατασκευής. Οι σφαιρικές δεξαμενές δέχονται πίεση μέχρι και 1 bar, απαιτούν μικρό χώρο εγκατάστασης, έχουν χωρητικότητα μεγαλύτερη από 5.000 m³ και υψηλό κόστος κατασκευής. Οι κυλινδρικές δεξαμενές δέχονται πίεση μέχρι και 10 bar, απαιτούν μικρό χώρο εγκατάστασης, έχουν χαμηλή χωρητικότητα, μέχρι 1.000 m³ και χαμηλό κόστος κατασκευής¹.

Οι δεξαμενές μεμβράνης χρησιμοποιούν όλον τον διαθέσιμο χώρο αποτελεσματικά, απαιτούν μικρότερο χώρο εγκατάστασης ενώ αποτελούν και μια αξιόπιστη τεχνολογία. Ωστόσο, απαιτούν την ύπαρξη δευτερογενών φραγμάτων προκειμένου να υπάρξει περιορισμός μιας πιθανής διαρροής και χαρακτηρίζονται από υψηλότερο ρυθμό εξάτμισης (boil-off gas). Στον αντίποδα, υπάρχουν οι ανεξάρτητες δεξαμενές, οι οποίες διακρίνονται σε τύπου A, B και C.

Οι δεξαμενές τύπου A έχουν μεγάλη χωρητικότητα και αξιοποιούν αποτελεσματικά τον διαθέσιμο χώρο. Ωστόσο δε χρησιμοποιούνται από πλοία που κινούνται με LNG καθώς απαιτούν την ύπαρξη δευτερογενούς φράγματος για την αποτροπή πιθανής διαρροής αερίων, ενώ επιπλέον φέρουν υψηλό κόστος κατασκευής. Οι δεξαμενές τύπου B είναι κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο, ώστε η δημιουργία οποιασδήποτε ρωγμής να ανιχνεύεται εγκαίρως, προτού δημιουργηθεί σοβαρό πρόβλημα. Ο σχεδιασμός τέτοιων δεξαμενών βασίζεται στον προσδιορισμό των επιπέδων τάσης σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης και στη μελέτη των χαρακτηριστικών της διάδοσης της ρωγμής. Και σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται η εφαρμογή δευτερογενούς φράγματος².

Τέλος, οι δεξαμενές τύπου C, που είναι και ο συνηθέστερος τύπος δεξαμενών, κατασκευάζονται για χαμηλή χωρητικότητα, ενώ το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή πίεση του αερίου που φτάνει μέχρι και τα 5 bar. Η δε υψηλότερη πίεση μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 20 bar. Η υψηλή

¹ Μπέκα, Α. (2014). Η εφαρμογή του LNG ως καύσιμο σε πλοία τύπου Ro-Pax. Τμήμα Ναυτιλιακών σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/8984>

² Ζησιμόπουλος, Ε.-Χ. (2017). Εφαρμογή των μηχανών διπλού καυσίμου στην εμπορική ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/10451>

πίεση επιτρέπει στο καύσιμο να διαχέεται απευθείας χωρίς τη χρήση αντλιών. Οι δεξαμενές αυτές χαρακτηρίζονται επιπλέον από υψηλό ρυθμό ανεφοδιασμού και μία σχετικά εύκολη εγκατάσταση, ωστόσο έχουν υψηλές χωρικές απαιτήσεις. Διακρίνονται σε κυλινδρικές, που έχουν χωρητικότητα έως και 10.000 m³, και σε δίλοβες, με χωρητικότητα έως 20.000 m³.

4.3.2 Επιλογή κινητήρων για καύση LNG

Η χρήση του LNG για την πρόωση των πλοίων μπορεί να επιτευχθεί μέσω δύο κύριων τύπων κινητήρων: κινητήρες διπλού καυσίμου (dual-fueled engines) και κινητήρες καύσης μονού καυσίμου σε αέρια μορφή (single fuel gas engines). Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους κινητήρες που μπορούν να λειτουργούν τόσο με πετρέλαιο όσο και με φυσικό αέριο. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αποκλειστικά τους κινητήρες που λειτουργούν με μόνον ένα καύσιμο, και αυτό είναι το φυσικό αέριο^{1,2}.

4.3.2.1 Τετράχρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου

Οι κινητήρες διπλού καυσίμου χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε πλοία μεταφοράς LNG καθώς εκμεταλλεύονται την εξάτμισή του. Ειδικότερα, η πρόωση του πλοίου πραγματοποιείται με LNG όταν το πλοίο βρίσκεται εντός περιοχής SECA, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη περιοχή για την πρόωση χρησιμοποιείται ως καύσιμο το πετρέλαιο.

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων διπλού καυσίμου βασίζεται στον κύκλο Otto κατά την καύση LNG. Κατά την καύση πετρελαίου, η αρχή λειτουργίας βασίζεται στον κύκλο Diesel. Κατά τη λειτουργία με LNG, μια μικρή ποσότητα πετρελαίου χρησιμοποιείται ως σπινθηριστής, δηλαδή ως πηγή ανάφλεξης, η οποία αρχικώς διαχέεται και κατόπιν αναφλέγεται από τη θερμότητα που

¹ Ζησιμόπουλος, Ε.-Χ. (2017). Εφαρμογή των μηχανών διπλού καυσίμου στην εμπορική ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/10451>

² Πατέρα, Κ. (2018). Φυσικό αέριο στη ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο εδώ: <https://hellenicus.lib.aegean.gr/handle/11610/19920>

παράγεται λόγω συμπίεσης. Σημειώνεται πως σε έναν κύκλο Otto, άρα και κατά την κίνηση με LNG, το αέριο καύσιμο πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση χαμηλής πίεσης.

Ένα μεγάλο μειονεκτήματα των μηχανών που λειτουργούν με βάση τον κύκλο Otto αφορά στο φαινόμενο των διαρροών του άκαυστου μεθανίου (methane slip). Οι διαρροές αυτές μπορεί να σχετίζονται με τη λειτουργία του κινητήρα, ή με τη γενικότερη λειτουργία. Οι κινητήρες που βασίζονται στον κύκλο Otto, σε αντίθεση με τους κινητήρες που βασίζονται στον κύκλο Diesel, «επιτρέπουν» την ατελή καύση μεθανίου, με αποτέλεσμα άκαυστο μεθάνιο να εκπέμπεται άμεσα από τον κινητήρα. Οι δε διαρροές κατά τη γενικότερη λειτουργία αφορούν τις διαρροές μεθανίου που μπορεί να συμβούν σε οποιαδήποτε στιγμή, τόσο κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού όσο και κατά τη διάρκεια που το φυσικό αέριο παραμένει αποθηκευμένο σε χερσαίες δεξαμενές¹.

Το μεθάνιο αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου και έχει έως και 25 φορές αρνητικότερη επίδραση σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα. Αυτό σημαίνει ότι μόλις μια μικρή ποσότητα εκπεμπόμενου μεθανίου ανά κιλοβατόρα δύναται να επιβαρύνει κατά 10 με 15% τις εκπομπές αερίων ενός πλοίου που κινείται με LNG².

4.3.2.2 Δίχρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου

Αυτός ο τύπος κινητήρων χρησιμοποιεί είτε αποκλειστικά πετρέλαιο είτε μείγμα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον κύκλο Diesel. Κατά την καύση LNG, το πετρέλαιο, σε μια ικανή ποσότητα της τάξης του 5%, χρησιμοποιείται και εδώ ως σπινθηριστής, με σκοπό την ανάφλεξή του και κατόπιν την ανάφλεξη του αερίου².

4.3.2.3 Κινητήρες φυσικού αερίου

¹ Πατέρα, Κ. (2018). Φυσικό αέριο στη ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα ναυτιλίας και επιχειρηματικών υπηρεσιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο εδώ: <https://hellanicus.lib.aegean.gr/handle/11610/19920>

² Ζησιμόπουλος, Ε.-Χ. (2017). Εφαρμογή των μηχανών διπλού καυσίμου στην εμπορική ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/10451>

Όσον αφορά στους κινητήρες φυσικού αερίου, η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον κύκλο Otto/Miller. Ως σπινθηριστής χρησιμοποιείται ένα πλούσιο μείγμα αερίου και αέρα, το οποίο αναφλέγεται οδηγώντας σε ανάφλεξη του φτωχού μείγματος που βρίσκεται στον κύλινδρο. Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτών των τύπων κινητήρων αποτελούν η διατήρηση υψηλής απόδοσης και η πλήρης συμμόρφωση με τους κανονισμούς του IMO για το οξειδία του αζώτου.

4.4 Οικονομικές απαιτήσεις

Η μετατροπή ενός πλοίου για χρήση του LNG ως καυσίμου θέτει ορισμένες τεχνικές, ρυθμιστικές και οικονομικές προκλήσεις. Προκειμένου να αξιολογηθεί σε ποιο βαθμό η επένδυση της μετασκευής ενός πλοίου ή της ναυπήγησης ενός νέου για κίνηση με LNG είναι αποδοτική, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) και οι λειτουργικές δαπάνες (OPEX) και τις δαπάνες του κύκλου ζωής.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, με τον όρο κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) αναφερόμαστε στους οικονομικούς πόρους που δαπανώνται για την αγορά ή την αναβάθμιση ενός περιουσιακού στοιχείου. Με τον όρο κεφαλαιουχικές δαπάνες εν προκειμένω αναφερόμαστε στα αρχικά έξοδα που θα πραγματοποιηθούν για τη μετασκευή (αναβάθμιση) ή την αγορά ενός νέου πλοίου. Όσον αφορά στη μετασκευή, στα κόστη αυτά θα πρέπει να συνυπολογιστούν τα κόστη αγοράς και τοποθέτησης του κινητήρα, των διάφορων συστημάτων μεταφοράς των καυσίμων εντός του πλοίου, των συστημάτων εξαερισμού και θέρμανσης, του εξοπλισμού προμήθειας του αερίου, των δεξαμενών αποθήκευσης κ.ά. Επιπλέον, στα κεφαλαιουχικά κόστη περιλαμβάνονται και η εκπαίδευση του προσωπικού που απαιτείται.

Επιπρόσθετα κόστη είναι πιθανό να προκύψουν και από την απαίτηση για κατάλληλη μηχανική σχεδίαση του πλοίου. Είναι πιθανό, με άλλα λόγια, να απαιτείται αναθεώρηση των σχεδίων προκειμένου να δημιουργηθεί ο χώρος εγκατάστασης του εξοπλισμού αλλά και αναθεώρηση όλων των σχηματικών και ηλεκτρικών διαγραμμάτων του πλοίου, ούτως ώστε να ανταποκρίνεται στον σχεδιασμό για LNG, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο τον δείκτη CAPEX.

Στις λειτουργικές δαπάνες (OPEX) από την άλλη περιλαμβάνονται όλα εκείνα τα έξοδα που πρέπει να πραγματοποιούνται προκειμένου το πλοίο να παραμένει λειτουργικό. Σε αυτήν την

κατηγορία εμπίπτουν τα κόστη για τη συντήρηση του πλοίου, για τυχόν επισκευές, αλλά και τα κόστη από την αγορά καυσίμου. Σημειώνεται πως η αγορά του φυσικού αερίου είναι εν γένει ασταθής, και συνεπώς τα λειτουργικά κόστη είναι πιθανό να αυξομειώνονται αρκετά συχνά. Πάντως, τα κόστη συντήρησης ενός κινητήρα που χρησιμοποιεί το φυσικό αέριο, σε αντίθεση με έναν κινητήρα πετρελαίου, είναι χαμηλότερα, κυρίως λόγω της καθαρότητας του LNG αλλά και της πιο πλήρους καύσης του.

Το άθροισμα των κεφαλαιουχικών και των λειτουργικών δαπανών (CAPEX και OPEX) ορίζεται ως δαπάνες του κύκλου ζωής. Ο κύκλος ζωής ενός πλοίου καθορίζεται περίπου στα 25 με 30 χρόνια, και συνέπεια θα πρέπει να εκτιμηθεί εάν ένα «γηραιότερο» πλοίο συμφέρει να μετασκευαστεί για χρήση του LNG ως καυσίμου, ή η ναυπήγηση ενός νέου πλοίου με κινητήρα καύσης LNG είναι πιο συμφέρουσα.

Τέλος, είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η αποδοτικότητα της επένδυσης από την εγκατάσταση ενός κινητήρα που λειτουργεί με LNG εξαρτάται από τη σχέση της τιμής μεταξύ του LNG και του ελαφρού και βαριού πετρελαίου. Η συσχέτιση των τιμών αυτών υπακούει φυσικά στον νόμο της ζήτησης και προσφοράς, αλλά καθορίζεται και από άλλες, απρόβλεπτες μεταβλητές, όπως είναι οι εκάστοτε γεωπολιτικές συνθήκες.

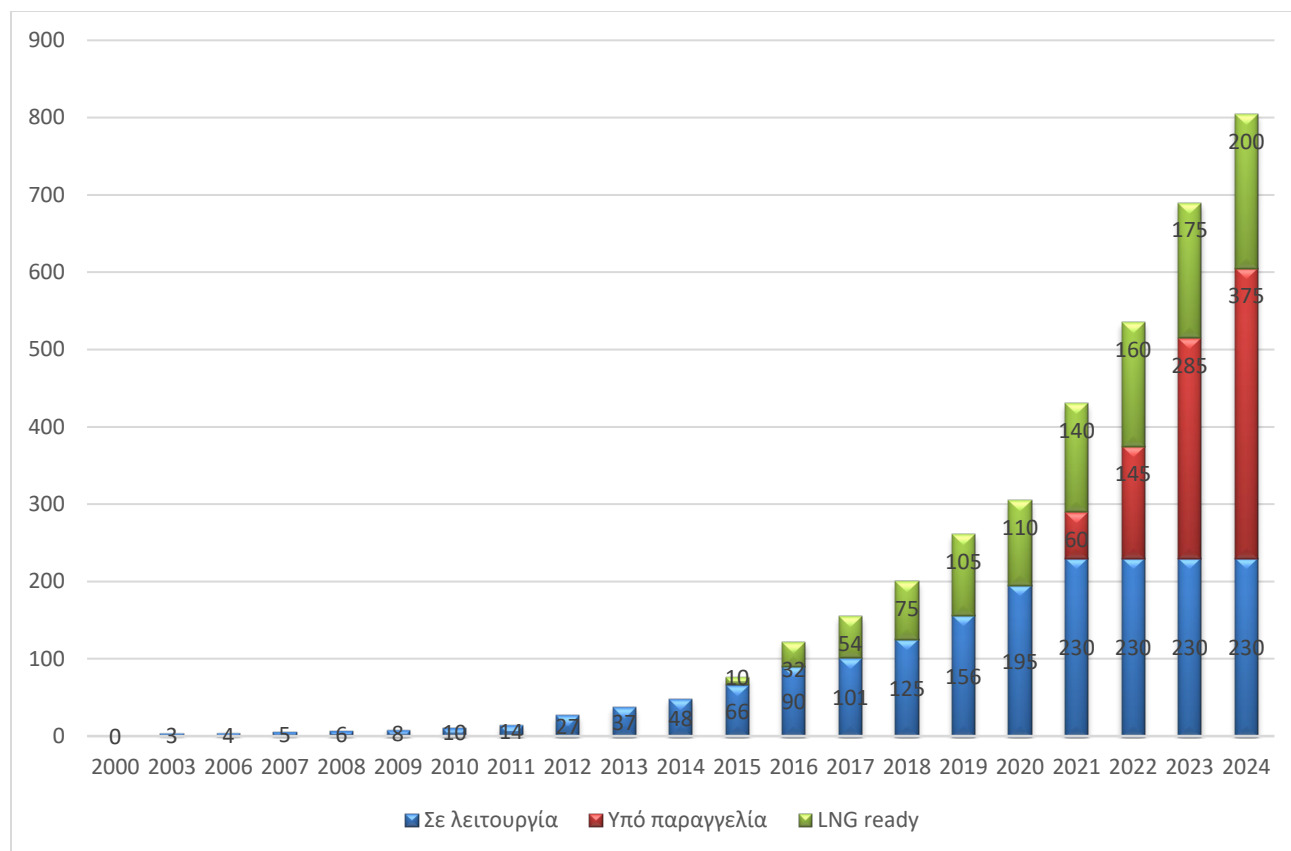
4.5 Πρόσφατες εξελίξεις στη χρήση του LNG στη διεθνή ναυτιλία

Το 2021 σηματοδοτήθηκε ως το έτος ευρείας χρήσης του LNG ως ναυτιλιακού καυσίμου ενισχύοντας τις προσπάθειες για την απανθρακοποίηση του ναυτιλιακού κλάδου, όπως επιτάσσουν και τα πρόσφατα πρότυπα του IMO το 2020. Οι παραγγελίες για κατασκευή πλοίων που δύνανται να αξιοποιούν ως καύσιμο το LNG έφθασαν σε επίπεδα ρεκόρ, ενώ οι σχετικές υποδομές ανεφοδιασμού συνέχισαν να επεκτείνονται με γοργό ρυθμό. Επιπλέον, κατά το 2021 σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην αύξηση της παραγωγής bioLNG και ανανεώσιμου συνθετικού LNG, τα οποία αναμένεται να αντικαταστήσουν το LNG ως καύσιμο τις επόμενες δεκαετίες, καθιστώντας καθ' αυτόν τον τρόπο το LNG ένα καύσιμο μεταβατικό. Το LNG μπορεί να αποτελέσει το μεταβατικό καύσιμο καθώς όλες οι υποδομές ανεφοδιασμού LNG καθώς και τα υποστηρικτικά συστήματα LNG και φυσικού αερίου μπορούν να αποθηκεύουν και να μεταφέρουν

bioLNG και ανανεώσιμο συνθετικό LNG χωρίς να απαιτούνται επιπλέον τροποποιήσεις και πρόσθετες επενδύσεις. Αναμένεται συνεπώς πως τα κατάλληλα διαμορφωμένα πλοία που μπορούν να χρησιμοποιούν το LNG ως καύσιμο καθώς και τα πλοία και οι εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού δε θα χάσουν την αξία τους από τον περιορισμό της χρήσης του LNG και την αντικατάσταση του από το bioLNG και το συνθετικό LNG¹.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 9, μόλις το 2003 τέθηκαν σε λειτουργία τα πρώτα πλοία που χρησιμοποιούσαν το LNG ως καύσιμο. Παρατηρούμε ότι τα πλοία αυτά παρέμειναν λιγότερα από 100 μέχρι και το 2015, απ' όπου ξεκινάει μία ανοδική πορεία στον αριθμό των πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο και όσων χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα αλλά δύνανται να τροποποιηθούν για χρήση LNG (LNG ready). Το 2020 τα πλοία που κινούνται με LNG ή είναι LNG ready ξεπερνούν τα 300, ενώ το 2021 τα πλοία αυτά, εάν συνυπολογιστούν και οι παραγγελίες νέων πλοίων αγγίζουν τα 450, σημειώνοντας μία αύξηση περίπου 50%. Για το 2022 ο συνολικός αριθμός κινούμενων με LNG, LNG ready και παραγγελθέντων πλοίων φτάνει τα 530. Το 2023 και το 2024 τα αντίστοιχα νούμερα αναμένεται να είναι 680 και 805. Παρατηρούμε ότι μέσα σε μια εξαετία (2018-2024) ο αριθμός των πλοίων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG και που δύνανται να χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG έχει τετραπλασιαστεί (συμπεριλαμβανομένων των παραγγελθέντων πλοίων). Η τεράστια αυτή αύξηση οφείλεται φυσικά στις πιέσεις που ασκεί ο IMO για εφαρμογή των διατάξεών του περί περικοπής των εκπομπών θείου στον ναυτιλιακό κλάδο.

¹ https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.pdf



*Διάγραμμα 9. Πλήθος πλοίων σε λειτουργία και υπό παραγγελία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG, καθώς και πλοίων που δύνανται να τροποποιηθούν για χρήση καυσίμου LNG, 2000-2024¹
(Επεξεργασία δεδομένων από: SEA-LNG. (2022). LNG – A Fuel in Transition. Διαθέσιμο εδώ: https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.pdf)*

Από τον Ιανουάριο του 2021 μέχρι τον Ιανουάριο του 2022, ο όγκος των παραγγελιών νεότευκτων πλοίων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG έχει επιταχυνθεί δραματικά και πλησίασε μέχρι και το 30% των συνολικών παραγγελιών (όλων των πλοίων) σύμφωνα με την Clarksons. Για ορισμένους τύπους πλοίων, όπως τα εξαιρετικά μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που στηρίζουν το παγκόσμιο εμπορικό σύστημα, περισσότερο από το 50% των παραγγελιών αφορούν είτε σε πλοία που χρησιμοποιούν το LNG ως καύσιμο, είτε σε πλοία που χαρακτηρίζονται ως «LNG ready», δηλαδή πλοία που κινούνται με συμβατικό καύσιμο αλλά έχουν τη δυνατότητα να τροποποιηθούν και να μπορούν να χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG.

¹ Τα στοιχεία αντιστοιχούν στον Ιανουάριο του κάθε έτους. Συνεπώς τα στοιχεία για το 2022 μόνο στον πρώτο μήνα του έτους και τα πραγματικά νούμερα για το έτος 2022 είναι σαφώς μεγαλύτερα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραγγελίες πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με χρήση καυσίμου LNG πενταπλασιάστηκαν από τον Ιανουάριο του 2020 σε σχέση με τον Ιανουάριο του 2022. Η παραγγελία δεξαμενόπλοιων που χρησιμοποιούν LNG επταπλασιάστηκε ενώ η παραγγελία φορτηγών πλοίων ξηρού φορτίου διπλασιάστηκε, σε διάστημα μόλις 18 μηνών. Αναμένεται ότι πάνω από το 90% των νέων Pure Car and Truck Carriers (PCTC) που θα εισέλθουν στην αγορά τα επόμενα χρόνια θα χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG¹.

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, το 2021 αποτέλεσε το έτος σημαντικής αύξησης στη χρήση του LNG ως καυσίμου στη διεθνή ναυτιλία, με περισσότερες από δώδεκα εταιρείες να ανακοινώνουν παραγγελίες περισσότερων του ενός πλοίων κατά τη διάρκεια του έτους:

- Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων: Η CMA CGM ενσωμάτωσε εννέα νέα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στον στόλο της το 2021² ενώ παρήγγειλε και δέκα καινούρια³. Η Zim ναύλωσε δέκα πλοία⁴, ενώ η Hapag Lloyd παρήγγειλε έξι νέα πλοία⁵.
- Φορτηγά πλοία ξηρού φορτίου: Η Mitsui OSK Lines, η NYK Line, η K Line⁶ και η Langh Ship⁷ ανακοίνωσαν παραγγελίες για πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG.
- Οχηματαγωγά πλοία: Η UECC ενσωμάτωσε τρία επιπλέον οχηματαγωγά πλοία, τα οποία φέρουν δυνατότητα συνδυασμένης ηλεκτροπρόωσης και κίνησης με LNG⁸, ενώ η Volkswagen ανακοίνωσε ότι θα διαθέτει τέσσερα νέα οχηματαγωγά πλοία με χρήση καυσίμου LNG μέχρι το 2039⁹. Η K Line και η NYK παρήγγειλαν οκτώ και δώδεκα PCTC με LNG αντίστοιχα¹⁰. Η NYK ειδικότερα ανακοίνωσε ότι ο στόλος της από PCTC με καύσιμα LNG θα προσεγγίσει τα 40 πλοία μέχρι το τέλος αυτής της δεκαετίας¹¹. Σε αντίστοιχη ανακοίνωση προχώρησε και η MOL, η οποία δήλωσε ότι θα διαθέτει έναν στόλο 90 πλοίων που κινούνται με LNG μέχρι το 2030, παραγγέλνοντας τέσσερα νέα

¹ https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.pdf

² CMA CGM. (2021). Ninth 23,000 TEU LNG-powered vessel.

³ Splash 24/7. (2021). CMA CGM in for ten 2,000 teu ships at KSOE.

⁴ Offshore Energy. (2021). ZIM charters another five 7,000 TEU LNG-fueled boxships from Seaspan Corp.

⁵ Hapag-Lloyd. (2021). Hapag-Lloyd orders another six ultra large container vessels of 23,500+ TEU.

⁶ ShipInsight. (2021). Japanese trio land orders for LNG-fuelled bulkers from JFE.

⁷ Ship & Bunker. (2021). Finland's Langh Ship orders three LNG-fuelled bulkers.

⁸ UECC. (2021). UECC floats first of three LNG battery hybrid PCTCs'.

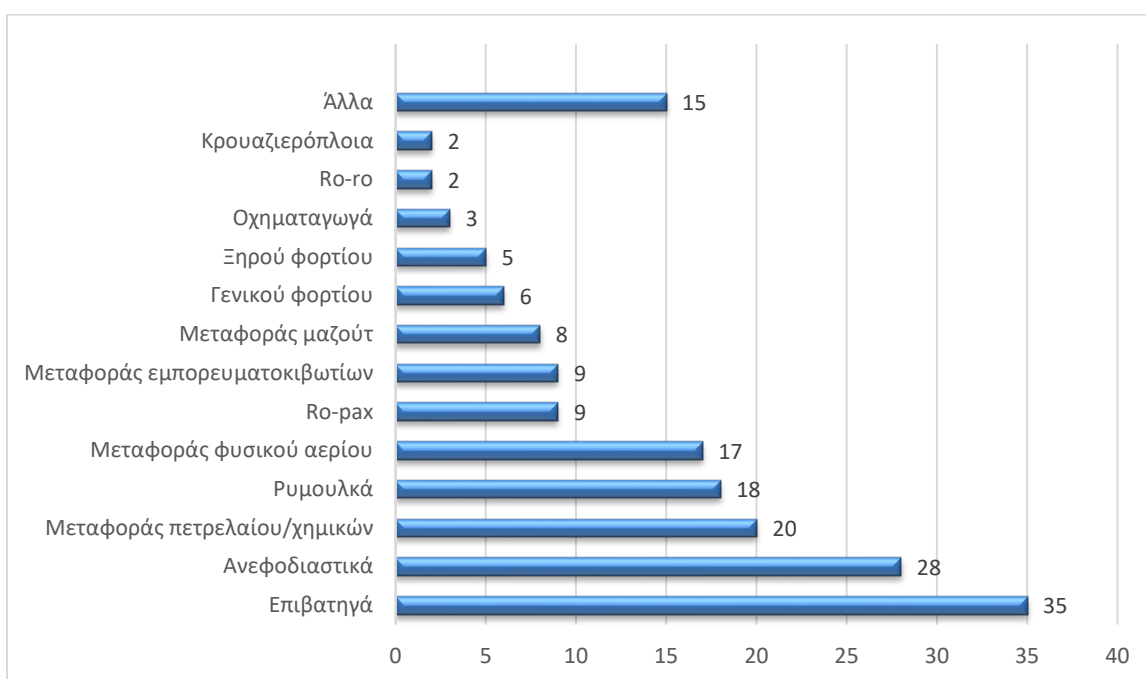
⁹ Ship & Bunker. (2021). Volkswagen taken on four more LNG-fuelled car carriers.

¹⁰ The Motorship. (2021). K Line inks deal for 8 x LNG-fuelled 7,000 ceu PCTCs.

¹¹ NYK. (2021). NYK to Build 12 LNG-Fueled PCTCs.

PCTC¹. Η Wallenius παρήγγειλε δύο νέα οχηματαγωγά πλοία με κίνηση LNG ενώ η Wallenius SOL παρήγγειλε επιπλέον δύο PCTC².

- Επιβατηγά πλοία: Η Brittany Ferries³ και η TT Line⁴ παρήγγειλαν η κάθε μία από δύο επιβατηγά πλοία που κινούνται με LNG, ενώ το Iona της P&O Cruises έκανε το παρθενικό του ταξίδι χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το LNG⁵. Τέλος, η AIDA και η Costa Cruises παρέλαβαν η κάθε μία το δεύτερο πλοίο του στόλου τους που κινείται με LNG, το AIDAcosma και το Costa Toscana αντίστοιχα⁶.



Διάγραμμα 10. Πλήθος κινούμενων με LNG πλοίων παγκοσμίως ανά τύπο, Μάιος 2020
(Επεξεργασία δεδομένων από: Statista. (2020). LNG-fueled ships worldwide, by type. May 2020.
Διαθέσιμο εδώ: <https://www.statista.com/statistics/1102212/lng-fueled-vessels-worldwide-by-type/>)

¹ MOL. (2021). MOL to Build Series of 4 LNG-fueled Car Carriers - progressing towards “90 LNG-fueled vessels by 2030.

² LNGPrime. (2021). Wallenius orders LNG-powered car carriers in China.

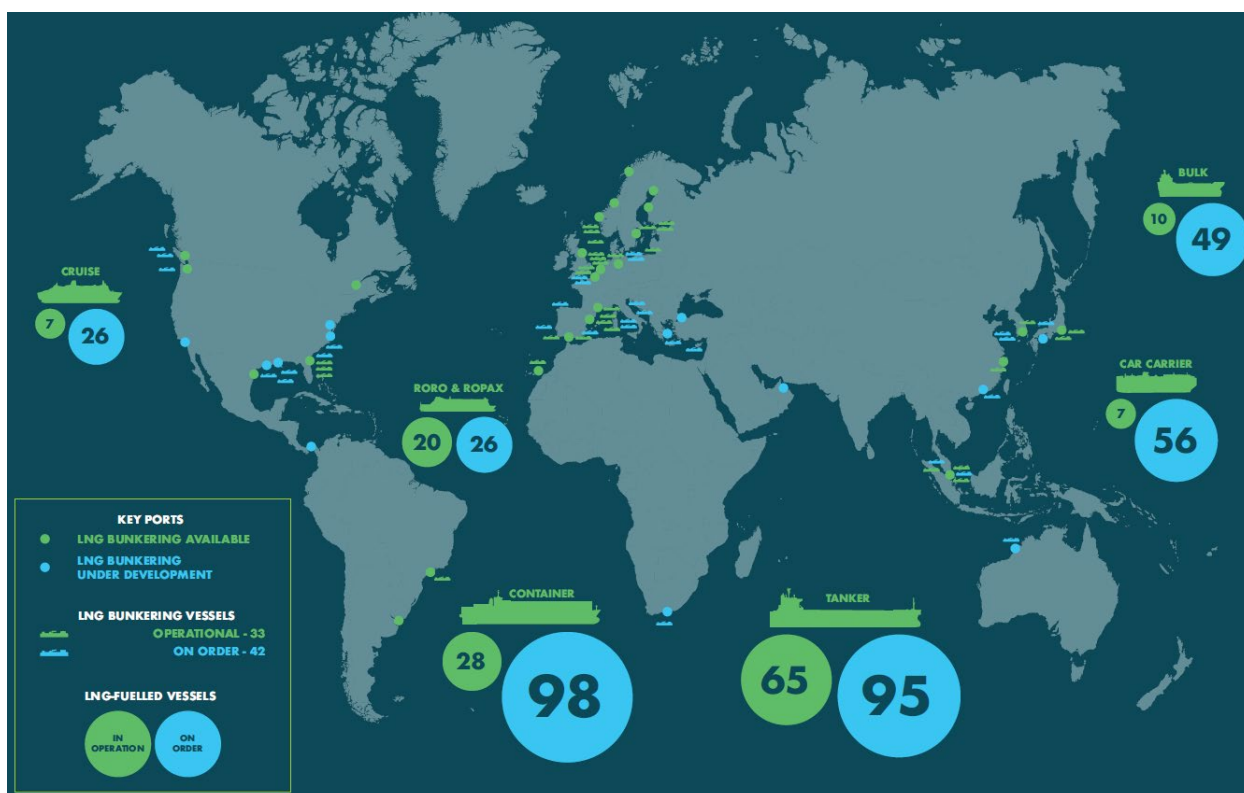
³ Offshore Energy. (2021). Brittany Ferries orders two LNG-electric ferries.

⁴ Offshore Energy. (2021). TT-Line launches its second LNG-powered RoPax ferry.

⁵ LNG Prime. (2021). ‘P&O Cruises’ LNG-powered Iona departs on maiden voyage.

⁶ Ship & Bunker. (2021). Costa Cruises takes delivery of third LNG-fuelled ship.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 10, τον Μάιο του 2020 υπήρχαν 177 πλοία σε λειτουργία που κινούνταν με καύσιμο LNG. Από αυτά τα 177 πλοία, τα 35 αντιστοιχούσαν σε επιβατηγά πλοία, τα 28 σε πλοία ανεφοδιασμού, τα 18 σε ρυμουλκά ενώ 37 εξ αυτών μετέφεραν πετρέλαιο, φυσικό αέριο και χημικά. Παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των πλοίων που κινούνται με LNG αντιστοιχεί σε οχηματαγωγά, φορτηγά πλοία μεταφοράς καυσίμων και χημικών, ρυμουλκά και ανεφοδιαστικά πλοία.



Εικόνα 4. Η χρήση του LNG ως καυσίμου στη διεθνή ναυτιλία και τοποθεσίες κύριων ανεφοδιαστικών λιμένων, Ιανουάριος 2022¹

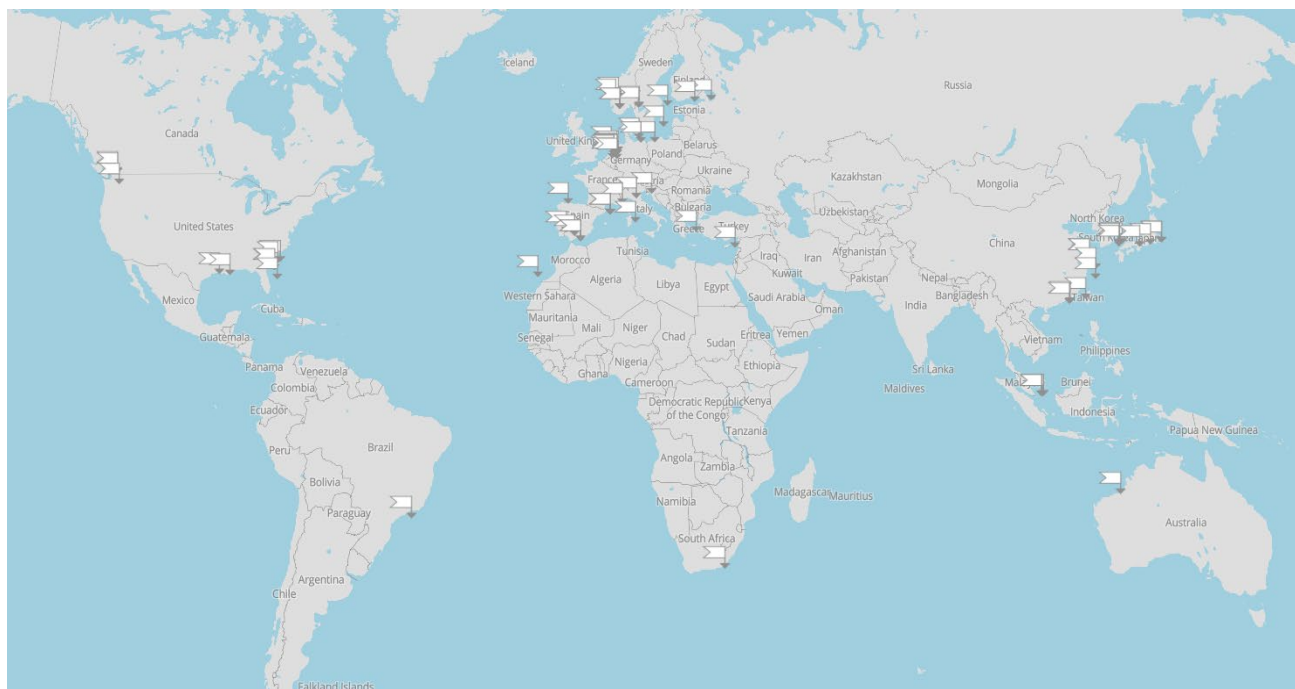
Δεδομένης της εκθετικής αύξησης της ναυπήγησης πλοίων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG, ο DNV προβλέπει ότι η ζήτηση για το καύσιμο αυτό θα τριπλασιαστεί έως το 2024, υπερβαίνοντας τους 3,5 εκατομμύρια τόνους. Όπως είναι φυσικό, παράλληλα αναμένεται να αυξηθούν οι υποδομές και τα πλοία ανεφοδιασμού LNG. Σύμφωνα με τον DNV τον Ιανουάριο

¹ https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.pdf

του 2022 υπήρχαν 33 LNG bunkers σε λειτουργία, ενώ υπό παραγγελία ή υπό διαπραγμάτευση βρίσκονταν άλλα 42. Μέχρι το τέλος του 2022, τα LNG bunkers θα λειτουργούν στη Βόρεια Ευρώπη, τη Μεσόγειο, τις ΗΠΑ, τον Καναδά, τη Νότια Κορέα, την Ιαπωνία, τη Μαλαισία, την Κίνα, τη Σιγκαπούρη, τη Βραζιλία και τη Νότια Αφρική. Ο ανεφοδιασμός σε LNG είναι δυνατός σε 141 λιμάνια παγκοσμίως, σύμφωνα με στοιχεία για τον Ιανουάριο του 2022, με την Clarkson να προβλέπει ότι ο αριθμός αυτός θα αυξηθεί σε 170 μέχρι το τέλος του έτους. Η TotalEnergies προβλέπει ότι η ανεφοδιασμός LNG θα αντιπροσωπεύει το 10% του παγκόσμιου ανεφοδιασμού καυσίμων μέχρι το 2030¹.

Η εικόνα 4 παρουσιάζει εν λειτουργία και υπό παραγγελία πλοία που χρησιμοποιούν το LNG ως καύσιμο ανά τύπο πλοίου σύμφωνα με στοιχεία του Ιανουαρίου του 2022. Παράλληλα, στον χάρτη επισημαίνονται τα σημαντικότερα λιμάνια που μπορούν να εφοδιάζουν τα πλοία με LNG αλλά και τις υπό κατασκευή εγκαταστάσεις. Παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των λειτουργικών και υπό κατασκευή λιμανιών ανεφοδιασμού με LNG βρίσκονται στην Ευρώπη, και ειδικότερα στη Βόρεια Ευρώπη, ενώ ένα σημαντικό πλήθος αυτών βρίσκονται και στη Βόρεια Αμερική.

¹ https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.pdf



Εικόνα 5. LNG bunkers εν λειτουργία και υπό κατασκευή, 2022¹

Προκειμένου να μπορέσει το LNG να καθιερωθεί ως ναυτιλιακό καύσιμο, θα πρέπει να είναι διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες και ο ανεφοδιασμός να πραγματοποιείται με μεγάλη ευελιξία. Η άμεση διαθεσιμότητα σε ικανές ποσότητες και η ευελιξία μπορεί να παρέχεται μόνο από τα ανεφοδιαστικά πλοία LNG (bunkers). Η εικόνα 5 παρουσιάζει τις τοποθεσίες στις οποίες (θα) λιμενίζονται τα εν λειτουργία και υπό κατασκευή LNG bunkers, δηλαδή τα πλοία που έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν και να μεταφέρουν LNG προκειμένου να εφοδιάζουν άλλα πλοία εν πλω. Στα τέλη του 2018 εννέα τέτοια πλοία καυσίμων ήταν σε λειτουργία, ενώ στις αρχές του 2017 υπήρχε μόλις ένα τέτοιο πλοίο. Τον Ιανουάριο του 2022 υπήρχαν συνολικά 33 LNG bunkers και άλλα 42 είχαν ήδη παραγγελθεί.

¹ <https://sea-lng.org/bunker-navigator/>

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Ήδη από το 2005 είχαν ξεκινήσει οι προσπάθειες για τον περιορισμό των εκπομπών SO_x που παράγονται στον ναυτιλιακό τομέα με τη διεθνή σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία, γνωστή ως MARPOL. Η σύμβαση έθεσε το όριο σε σχέση με το θείο στο πετρέλαιο σε 4,5 % κ. β. Έκτοτε, το όριο αυτό μειώθηκε άλλες δύο φορές, φτάνοντας στο 3,5% το 2012 και στο 0,5% το 2020. Το δε όριο σε περιοχές ελέγχου των εκπομπών (SECA) βρίσκονταν στο 0,1% ήδη από το 2015. Απαιτήθηκε, συνεπώς, από τους πλοιοκτήτες να στραφούν σε εναλλακτικές επιλογές για τα καύσιμα των πλοίων τους, προκειμένου να συμμορφωθούν με τις επιταγές του IMO. Τέτοιες επιλογές περιλαμβάνουν τα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο καύσιμα, τα βιοκαύσιμα, την εγκατάσταση πλυντρίδων για τη συνέχιση χρησιμοποίησης υψηλής περιεκτικότητας σε θείο καυσίμων, την ηλεκτροπρόωση κ.ά. Μία εκ των ευρέως διαδεδομένων επιλογών, που υιοθετήθηκαν από τους πλοιοκτήτες, είναι η καύση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG), λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων που φέρει.

Η χρησιμοποίηση του LNG ως ναυτιλιακού καυσίμου μειώνει, σύμφωνα με μετρήσεις, τις εκπομπές σε SO_x μέχρι και 99%, καθιστώντας το καύσιμο αυτό συμβατό με τα πρότυπα του IMO. Παράλληλα, με τη χρήση του LNG μειώνονται οι εκπομπές CO₂ κατά περίπου 20-30%, οι εκπομπές NO_x κατά 90% ενώ σημαντικά μειώνονται και οι εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τον DNV ο δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας του σκάφους (EEXI) βελτιώνεται κατά περίπου 25% από τη χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου καυσίμου. Πάντως, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η εκτεταμένη χρησιμοποίηση του LNG είναι πιθανό να οδηγήσει σε αυξημένες εκπομπές μεθανίου, το οποίο συνιστά βασικό συστατικό στοιχείο του φυσικού αερίου αλλά και αέριο του θερμοκηπίου.

Σε κάθε περίπτωση, το LNG δεν αποτελεί τη μοναδική επιλογή για τους πλοιοκτήτες, προκειμένου οι εκπομπές των αερίων από τους κινητήρες των πλοίων τους να είναι εντός των ορίων, όπως αυτά ετέθησαν με την τελευταία τροποποίηση του 2020. Η συμμόρφωση με τα πρότυπα του IMO μπορεί να επιτευχθεί επίσης με τη χρησιμοποίηση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, τα οποία ωστόσο είναι εν γένει ακριβά, ή με την εγκατάσταση πλυντρίδων, οι οποίες αφαιρούν το θείο από τις εκπομπές αερίων των κινητήρων των πλοίων, η εγκατάσταση όμως τέτοιων συστημάτων μπορεί να είναι κοστοβόρα και χρονοβόρα. Άλλες επιλογές αποτελούν η κίνηση με

ηλεκτρισμό, η οποία ωστόσο απαιτεί ένα υψηλό συνολικό κόστος εγκατάστασης και επιφέρει υψηλές απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης σε σχέση με ένα μηχανικό σύστημα, αλλά και τα βιοκαύσιμα, τα οποία ωστόσο δεν παράγονται σε αρκετά μεγάλες ποσότητες προκειμένου να μπορούν να καταστούν ένα αξιόπιστο καύσιμο στη ναυτιλία, είναι εν γένει πιο ακριβά σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, και τέλος παρατηρούνται χαμηλά επίπεδα τεχνογνωσίας στον χειρισμό και τη χρήση βιοκαυσίμων στον ναυτιλιακό τομέα.

Όσον αφορά το κόστος του LNG, ιστορικά η τιμή είναι ακριβότερη από τα καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο, οι εκπομπές των Sox από την καύση των οποίων ωστόσο δεν εμπίπτουν εντός των ορίων που έχουν τεθεί από τον IMO και ως εκ τούτου απαιτείται η εγκατάσταση πλυντρίδων, οι οποίες μειώνουν το ποσοστό των εκπεμπόμενων SO_x. Από την άλλη, ιστορικά η τιμή του LNG είναι φθηνότερη από εκείνη των καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και του ναυτιλιακού πετρελαίου εσωτερικής καύσης (Marine Gas Oil - MGO). Ως εκ τούτου, το LNG αποδεικνύεται πιο συμφέρον για χρήση στον ναυτιλιακό τομέα ως καύσιμο πλοίων. Πάντως, οι αρχικές προβλέψεις για τη χαμηλή τιμή του LNG δεν επαληθεύθηκαν, με την τιμή του να είναι σαφώς αυξημένη σε σχέση με την προβλεπόμενη. Αυτό οφείλεται στην ασταθή γενικώς οικονομία του φυσικού αερίου, στη μη παγκοσμιοποιημένη φύση της αγοράς του φυσικού αερίου, εν αντιθέσει με εκείνη του πετρελαίου, στα επιπλέον κόστη αποθήκευσης και μεταφοράς του LNG, αλλά και του μάρκετινγκ, τα οποία διαφέρουν από λιμένα σε λιμένα αλλά και στις εκάστοτε γεωπολιτικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα η εισβολή των ρωσικών στρατευμάτων στην Ουκρανία, η οποία επέφερε αστάθεια και αβεβαιότητα (και) στην αγορά του φυσικού αερίου.

Υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα μετασκευής ή ναυπήγησης «υβριδικών» πλοίων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούν τόσο το LNG όσο και προϊόντα πετρελαίου ως καύσιμα, προσφέροντας μεγάλη ευελιξία. Σημαντική κρίνεται και η δυνατότητα ναυπήγησης των λεγόμενων «LNG ready» πλοίων, δηλαδή πλοίων στα οποία έχουν ήδη πραγματοποιηθεί οι σχετικές ρυθμιστικές πρωτοβουλίες για την υιοθέτηση της πρακτικής της καύσης του LNG για την πρόωση του πλοίου στο μέλλον.

Θα πρέπει να υπογραμμιστεί και ο πλέον ταχύς ρυθμός ανάπτυξης των σχετικών υποδομών, δηλαδή εφοδιαστικών λιμένων και τερματικών σταθμών, αλλά και ναυπήγησης εφοδιαστικών πλοίων, στρώνοντας τον δρόμο για μία ευρεία υιοθέτηση του LNG ως καυσίμου, όπως άλλωστε ήταν και αναμενόμενο από τις επιταγές του IMO το 2020. Ενδεικτικά, τον Ιανουάριο του 2022

υπήρχαν 33 λειτουργικά εφοδιαστικά πλοία και άλλα 42 υπό παραγγελία, ενώ οι λιμένες που μπορούν να αποθηκεύουν και να εφοδιάζουν τα πλοία με LNG για τη χρήση του ως καυσίμου ξεπερνούσαν τους 140. Η ανάπτυξη αυτή των υποδομών είχε ως αποτέλεσμα μία σταθερή αύξηση των κινούμενων με LNG και των «LNG ready» πλοίων από το 2010 μέχρι και το 2020, ξεπερνώντας τα 300 πλοία το 2020, τα 380 το 2021, με περίπου 55 υπό παραγγελία, και τα 520 συνολικά το 2022, αν συνυπολογιστούν και τα υπό παραγγελία πλοία.

Συμπερασματικά, τα νέα όρια για τις εκπομπές των αέριων στον ναυτιλιακό κλάδο κατέστησαν το LNG ένα αρκετά δημοφιλές καύσιμο για την πρόωση των πλοίων, καθώς οι εκπεμπόμενες ποσότητες SO_x μειώνονται δραστικά. Αυτή η αναμενόμενη υιοθέτηση του LNG ως καυσίμου οδήγησε σε μία σημαντική ανάπτυξη των σχετικών υποδομών και των εφοδιαστικών πλοίων για την υποστήριξη ενός όλο και μεγαλύτερου στόλου πλοίων που κινούνται με LNG. Επιπροσθέτως, το LNG προσφέρει σημαντική μείωση στις εκπομπές CO₂, NO_x και αιωρούμενων σωματιδίων, ιστορικά χαμηλότερες τιμές από άλλα καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, ενώ οι σχετικές υποδομές επεξεργασίας, αποθήκευσης και μεταφοράς αλλά και οι δεξαμενές και οι κινητήρες που εγκαθίστανται στα πλοία για την αποθήκευση και την καύση του LNG είναι συμβατοί, δίχως να απαιτούνται περαιτέρω τροποποιήσεις, με το bioLNG και τα ανανεώσιμο συνθετικό LNG, τα οποία αναμένεται να αντικαταστήσουν το LNG ως καύσιμο στο μέλλον. Όλα τα παραπάνω, καθιστούν το LNG ένα βιώσιμο αλλά και μεταβατικό καύσιμο στον κλάδο της ναυτιλίας.

Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Ζησιμόπουλος, Ε. Χ. (2017). Εφαρμογή των μηχανών διπλού καυσίμου στην εμπορική ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/10451>

Isalos. (2016). Ένας Οδηγός για τις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών. Διαθέσιμο Εδώ: <https://www.isalos.net/2016/04/enas-odigos-gia-tis-emission-control-areas-ecas/>

Κοϊμτζής, Ε. (2019). Εξελίξεις και προοπτικές για τη χρήση του φυσικού αερίου ως καυσίμου στην ακτοπλοΐα. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο εδώ: <https://hellanicus.lib.aegean.gr/handle/11610/20270>

Κοτρίκλα, Α. (2015) Ναυτιλία & Περιβάλλον, Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Μαστοράκης, Μ. (2018). Η Μετάβαση της Ναυτιλίας στο LNG Αναμένεται να Δημιουργήσει Αγορά 250 δις σε 5 έτη. Energy Press. Διαθέσιμο Εδώ: <https://energypress.gr/news/i-metavasi-tis-nautilias-sto-lng-anamenetai-na-dimioyrgisei-mia-agera-250-dis-dolarion-mesa-sta>

Μπέκα, Α. (2014). Η εφαρμογή του LNG ως καύσιμο σε πλοία τύπου Ro-Pax. Τμήμα Ναυτιλιακών σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/8984>

Ναυτεμπορική. (2018). LNG: Το Καύσιμο του Μέλλοντος – Μια Ρεαλιστική & Βιώσιμη Διέξοδος για το Τομέα της Ναυτιλίας. Διαθέσιμο Εδώ: <https://www.naftemporiki.gr/finance/story/1424019/lng-to-kausimo-tou-mellontos-mia-realistiki-kai-biosimi-dieksodos-gia-ton-nautiliako-tomea>

Πατέρα, Κ. (2018). Φυσικό αέριο στη ναυτιλία. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. Διαθέσιμο εδώ: <https://hellanicus.lib.aegean.gr/handle/11610/19920>

Χαβιάρης, Ι. (2014). Η εφαρμογή LNG ως καυσίμου σε πλοία Ro-Pax. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. Διαθέσιμο εδώ: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/6999>

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

CMA CGM. (2021). Ninth 23,000 TEU LNG-powered vessel.

Congressional Research Service. (2019). LNG as a Maritime Fuel: Prospects & Policy, CRS Report. Διαθέσιμο εδώ: <https://sgp.fas.org/crs/misc/R45488.pdf>

DNV – GL, LNG Safety – Sufficient Safety Barriers Must be in Place in Order to Keep the Risk Within Acceptable Limits, Διαθέσιμο εδώ: <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/lng-safety.html>

DNV GL, About us, World Leading, Διαθέσιμο εδώ: <https://www.dnv.com/about/index.html>

Equasis (Electronic Quality shipping Information System). (2020). The 2020 World Merchant Fleet. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.equasis.org/Fichiers/Statistique/MOA/Documents%20availables%20on%20statistics%20of%20Equasis>

Global LNG Hub. (2019). LNG as a Maritime Fuel: Prospects and Policy. Διαθέσιμο εδώ: <https://globallnghub.com/report-presentation/lng-as-a-maritime-fuel-prospects-and-policy>

Hapag-Lloyd. (2021). Hapag-Lloyd orders another six ultra large container vessels of 23,500+ TEU.

IMO. (2020). Taking Bold Action to Clean up Shipping Emissions by Reducing the Sulphur Content in Ships' Fuel oil. Διαθέσιμο εδώ: https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/Sulphur%202020%202-page%20flyer_draft_19-6-2019_online_final.pdf

IMO, Sulphur 2020 – Cutting Sulphur Oxide Emissions, Διαθέσιμο εδώ: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>

Jordan, J., & Hickin, P. (2017). Tackling 2020: The Impact of the IMO and How Shipowners Can Deal with Tighter Sulfur Limits.

Lasek, M. (2017). What Does IMO's 0.50% Sulphur Cap Decision Mean for the Bunker Supply Chain?. Ship and Bunker.

- Libby, G., & Ghaddar, A. (2018). Shipping's 2020 Low Sulphur Fuel Rules Explained. Reuters.
- LNG Prime. (2021). Wallenius orders LNG-powered car carriers in China.
- LNG Prime. (2021). 'P&O Cruises' LNG-powered Iona departs on maiden voyage.
- Marine Log. (2018). Decision Time.
- MARPOL Annex VI. (2020). Prevention of Air Pollution from Ships. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.rempec.org/en/knowledge-centre/online-catalogue/3-zb-l01-marpol-annex-vi-regulations-final.pdf>
- Mr. Arthur McWhinnie, CSC Board Member & Chairman, Cyprus Shipping Chamber's Marine Committee, Managing Director, Bernhard Shulte Shipmanagement (Cyprus), Poseidon Med II, Ζωντανή ροή Poseidon Med II, https://www.youtube.com/watch?v=B_zCMmiaTHg
- Mokhatab, S., Mak, J., Valappil, J., & Wood, D. A. (2014). Handbook of Liquefied Natural Gas. Elsevier. United States.
- MOL. (2021). MOL to Build Series of 4 LNG-fueled Car Carriers - progressing towards "90 LNG-fueled vessels by 2030.
- NYK. (2021). NYK to Build 12 LNG-Fueled PCTCs.
- Offshore Energy. (2021). ZIM charters another five 7,000 TEU LNG-fueled boxships from Seaspan Corp.
- Offshore Energy. (2021). Brittany Ferries orders two LNG-electric ferries.
- Offshore Energy. (2021). TT-Line launches its second LNG-powered RoPax ferry.
- Ross, S. (2021). CAPEX vs. OPEX: What's the Difference? Investopedia. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.investopedia.com/ask/answers/112814/whats-difference-between-capital-expenditures-capex-and-operational-expenditures-opex.asp>
- Saul, J. (2018). New Fuel Rules Push Shipowners to Go Green with LNG. Reuters. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.reuters.com/article/us-shipping-fuel-lng-analysis-idUSKBN1L0118>
- SEA-LNG. (2022). LNG – A Fuel in Transition. Διαθέσιμο εδώ: https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge_.pdf

ShipInsight. (2021). Japanese trio land orders for LNG-fuelled bulkers from JFE.

Ship & Bunker. (2021). Finland's Lantta Ship orders three LNG-fuelled bulkers.

Ship & Bunker. (2021). Volkswagen taken on four more LNG-fuelled car carriers.

Ship & Bunker. (2021). Costa Cruises takes delivery of third LNG-fuelled ship.

Splash 24/7. (2021). CMA CGM in for ten 2,000 teu ships at KSOE.

Statista. (2020). LNG-fueled ships worldwide, by type. May 2020. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.statista.com/statistics/1102212/lng-fueled-vessels-worldwide-by-type/>

Statista. (2022). Largest operational liquefied natural gas terminals by capacity worldwide as of 2021. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.statista.com/statistics/1263935/largest-operational-lng-terminals-by-capacity-worldwide/>

Statista. (2022). Largest liquefied natural gas terminals in construction or proposal stage worldwide as of 2021, by capacity. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.statista.com/statistics/1251661/largest-lng-terminals-proposed-or-in-construction-worldwide/>

The Motorship. (2021). K Line inks deal for 8 x LNG-fuelled 7,000 ceu PCTCs.

Timera Energy. (2018). Deconstructing LNG Shipping Costs. Διαθέσιμο εδώ: <https://timera-energy.com/deconstructing-lng-shipping-costs/>.

Thomson, H., Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2015). Natural Gas as a Marine Fuel. *Energy Policy*, 87, 153-167.

UECC. (2021). UECC floats first of three LNG battery hybrid PCTCs'.

UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). (2020). Review of Maritime Transport. Διαθέσιμο εδώ: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020ch2_en.pdf

U.S. Energy Information Administration. (2022). Henry Hub Natural Gas Spot Price. Διαθέσιμο εδώ: <https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>

Van Rynbach, E. A., Briers, K. E., & DelGatto, N. J. (2018). Analysis of Fuel Alternatives for Commercial Ships in the ECA Era, Revision 6, Herbert Engineering Corp.

Διαδικτυακές πηγές

<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Scrubbers-at-a-glance.html#:~:text=Time%20is%20pressing%3B%20the%202020,ships%20with%20confirmed%20scrubber%20projects.>

<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Scrubbers-at-a-glance.html>

<https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/singapore-lng-bunker-prices/>

<https://sea-lng.org/lng-bunker-fuel-prices/rotterdam-marine-fuel-lng-bunker-prices/>

<https://www.seanews.co.uk/shipping-news/lng-bunkering-gaining-momentum/>

https://www.osakagas.co.jp/en/whatsnew/1262289_11885.html

https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2022/03/LNG-2022_A-view-from-the-bridge.

<https://sea-lng.org/bunker-navigator/>